УДК 004.946 DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.188-201

# СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗОЛИРУЮЩИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

# С. Ю. Алексеев<sup>1</sup>, А. Ю. Захаров<sup>2</sup>

ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (1); sergei.alexeev-dt@yandex.ru; кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», kafedra@mail.gaps.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (2), г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: изолирующие дыхательные аппараты; система имитации процессов дыхания; структурно-параметрический синтез; тренажерные комплексы.

Аннотация: На основе анализа факторов, связанных с использованием дыхательного аппарата, и их влияния на человека поставлена задача структурнопараметрического синтеза функциональных моделей, решение которой обеспечило бы получение модели, воспроизводящей режимы работы дыхательного аппарата с заданной точностью, с учетом особенностей его конструкции и использования. Разработаны алгоритм решения сформулированной задачи, метод определения зависимостей изменения параметров работы дыхательного аппарата во времени, определены возможные варианты конструкции общих элементов.

#### Введение

При возникновении на производстве чрезвычайных ситуаций, сопровождающихся образованием непригодной для дыхания атмосферы, основным способом для обеспечения жизнедеятельности человека является применение дыхательных аппаратов. Универсальную защиту обеспечивают изолирующие дыхательные аппараты, которые применяются в условиях недостатка кислорода или при неизвестном составе загрязняющих воздух примесей. В этом случае человек и дыхательный аппарат образуют замкнутую систему, в которой режимы дыхания человека и работы аппарата взаимозависимы.

К достоинствам дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом относятся высокое удельное время защитного действия, длительные гарантийные сроки хранения, возможность длительного пребывания в состоянии ожидания использования при минимальных проверках готовности, минимальные масса и габариты аппаратов, что обуславливает их широкое использование персоналом промышленных предприятий.

Эффективность использования дыхательного аппарата повышается при наличии у пользователей дополнительной информации об особенностях протекающих в нем процессов, навыков дыхания в аппарате и выполнения в нем действий в соответствии с планом ликвидации аварии. В условиях стресса, болевого и психологического шока, возникающих в условиях аварийной ситуации, сознание человека нестабильно, что затрудняет или делает невозможной правильную эксплуатацию дыхательного аппарата. Поэтому, важно обеспечить пользователя устойчивыми навыками, доведенными до автоматизма. В настоящее время приобретение таких навыков осуществляется с помощью регенеративных тренажеров, представляющих собой полные функциональные модели дыхательных аппаратов с меньшим временем защитного действия. Они обеспечивают точное моделирование всего спектра воздействий, которые ощущает на себе человек при использовании дыхательного аппарата, но их применение сопряжено с большими экономическими затратами, связанными с утилизацией отработанного регенеративного продукта. Кроме того, они не позволяют оценить эффективность дыхания человека в дыхательном аппарате. Современный уровень развития средств вычислительной техники, мехатроники, цифровой обработки сигналов определяет возможность создания функциональных моделей дыхательных аппаратов, не использующих регенеративный кислородосодержащий продукт и выполняющих оценку эффективности дыхания человека в аппарате.

Ввиду многообразия конструкций дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом, определяющегося широким их распространением на промышленных производствах, актуальной является задача разработки метода структурно-параметрического синтеза функциональных моделей дыхательных аппаратов, в которых использование регенеративного продукта заменено генерацией и обработкой информации о режимах дыхания человека и работы дыхательного аппарата.

Цель работы — разработка метода структурно-параметрического синтеза функциональных моделей дыхательных аппаратов для повышения точности моделирования их рабочих характеристик, сокращения экономических затрат и времени в процессах их проектирования.

#### Постановка задачи структурно-параметрического синтеза функциональных моделей

На основании проведенных исследований изменения характеристик определены основные факторы, связанные с режимами функционирования изолирующих дыхательных аппаратов (ИДА) и особенностями их конструкций, оказывающие влияние на человека. Среди определенных факторов выделены ключевые, реакция человека на которые напрямую влияет на эффективность работы ИДА, и на основе их анализа сформулированы требования к функциональным моделям изолирующих дыхательных аппаратов:

– обеспечивать воспроизведение зависимостей изменения сопротивления вдоху и выдоху во времени в зависимости от глубины, частоты дыхания, с заданной точностью соответствующих законам изменения сопротивления вдоху и выдоху дыхательного аппарата при равных значениях глубины и частоты дыхания;

– обеспечивать воспроизведение закона изменения температуры газовой дыхательной смеси (ГДС) во времени в зависимости от глубины, частоты дыхания, с заданной точностью соответствующего закону изменения температуры ГДС на выходе аппарата при равных значениях глубины и частоты дыхания;

– конструктивно внешне быть идентичной дыхательному аппарату.

Замена в функциональной модели регенеративного продукта средствами мехатроники и компьютерного моделирования определяет ее как программноаппаратный комплекс. Функционирование модели обеспечивается за счет обработки информации о характеристиках процессов, протекающих в дыхательном аппарате и механике дыхания человека. На основе сформулированных требований разработана структурная схема модели (рис. 1).

Основными элементами структурной схемы являются два исполнительных устройства, обеспечивающих моделирование сопротивления дыханию и нагрев ГДС, а также устройство, обеспечивающее получение информации о режимах дыхания человека, обработка которой в процессе работы функциональной модели



Рис. 1. Структурная схема функциональной модели дыхательного аппарата

дает возможность получения требуемых для текущего момента времени режимов ее работы. Алгоритм функционирования модели определяется потоками данных в ней (рис. 2).

Основной целью решения задачи структурно-параметрического синтеза функциональной модели в рамках определенных требований является получение такого варианта конструкции, который обеспечивал бы максимальную точность моделирования режимов работы ИДА. Для разработанной структурной схемы задача формулируется следующим образом:

 – необходимо найти такие варианты конструкции подсистем нагрева ГДС, создания сопротивления дыханию и их взаимосвязей, при которых критерий (1) достигает минимума:

$$E(K, d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3) \to \min, \tag{1}$$

при ограничениях:

190

$$S(K) \le S_t \; ; \tag{2}$$

$$M(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}) = M_d;$$
(3)

$$\overline{Q}(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}) \le \overline{Q_r} ; \qquad (4)$$

$$\overline{J_d} - \varepsilon \le \overline{J}(K, \{K_1, K_2, ..., K_m\}) \le \overline{J_d} + \varepsilon,$$
(5)

где  $M(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}), M_d$  – соответственно массы модели и моделируемого дыхательного аппарата; S(K) – стоимость изготовления конструкции;  $\overline{J}(K, \{K_1, K_2, ..., K_m\}), \overline{J_d}$  – векторы геометрических параметров воздуховодной системы модели и дыхательного аппарата соответственно;  $\varepsilon$  – допустимая величина отклонения показателя размера элемента воздуховодной системы дыхательного аппарата при встраивании в него элемента модели;  $\overline{Q}(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}), \overline{Q_r}$  – векторы геометрических параметров обечаек



Рис. 2. Схема потоков данных функциональной модели

модели и дыхательного аппарата соответственно;  $d_{inh}$ ,  $d_{exh}$  – соответственно диаметры трактов вдоха и выдоха модели, по которым движется ГДС;  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  – определяющие размеры устройства, моделирующего нагрев газовой смеси;

$$E = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(T(\tau_{j}) - T_{s.4}(d_{inh}, l_{1}, l_{2}, l_{3})\right)^{2}}{\left(T_{0} - T_{1}\right)^{2}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(\Delta P_{inh,i}(\tau_{j}) - \Delta P_{s.inh,i}(d_{inh}, a_{inh,j})\right)^{2}}{\left(\Delta P_{0} - \Delta P_{1}\right)^{2}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(\Delta P_{exh,i}(\tau_{j}) - \Delta P_{s.exh,i}(d_{exh}, a_{exh,j})\right)^{2}}{\left(\Delta P_{0} - \Delta P_{1}\right)^{2}},$$
(6)

где  $T(\tau_j)$ ,  $T_{s.4}(d_{inh}, l_1, l_2, l_3)$  – температуры вдыхаемой газовой смеси, поступающей на вдох соответственно из дыхательного аппарата и модели;  $\Delta P_{inh,i}(\tau_j)$ ,  $\Delta P_{s.inh,i}(d_{inh}, a_{inh,j})$  – сопротивления вдоху, оказываемые соответственно дыхательным аппаратом и моделью;  $\Delta P_{exh,i}(\tau_j)$ ,  $\Delta P_{s.exh,i}(d_{exh}, a_{exh,j})$  – сопротивления выдоху, оказываемые соответственно дыхательным аппаратом и моделью;  $\tau_j$  – момент времени, для которого оценивается точность приближения показателей модели к показателям аппарата;  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $\Delta P_0$ ,  $\Delta P_1$  – нижний и верхний пределы, в которых изменяются значения температуры и сопротивления дыханию (определяются индивидуально для каждого ИДА в зависимости от области его применения);

$$\Delta P_{s.inh.i}(d_{inh}, a_{inh.j}, l_1, l_2, l_3) = \Delta P_{s.inh.i}(d_{inh}, a_{inh.j}) + \Delta P_{inh.pipe.1}(d_{inh}) + \Delta P_{pipe.2} + \Delta P_{heat}(d_{inh}, l_1, l_2, l_3);$$
(7)

$$\Delta P_{s,exh,i}(d_{exh}, a_{exh,j}) = \Delta P_{exh,i}(d_{exh}, a_{exh,j}) + \Delta P_{exh,pipe,1}(d_{exh}) + \Delta P_{pipe,2}, \qquad (8)$$

где  $\Delta P_{inh.pipe.1}(d_{inh})$ ,  $\Delta P_{exh.pipe.1}$  – соответственно сопротивления части конструкции трактов вдоха и выдоха, расположенной в обечайке регенеративного патрона без учета устройств моделирования нагрева и сопротивления дыханию;  $\Delta P_{pipe.2}$  – сопротивление воздуховодной системы, соединяющей обечайку патрона модели с лицевой частью;  $\Delta P_{heat}$ ,  $\Delta P_{s.inh.i}$  – сопротивления устройства нагрева ГДС и моделирования сопротивления вдоху соответственно.

Тракт вдоха, состоящий из четырех основных участков, показан на рис. 3. Первый  $l_1$  и третий  $l_3$  участки тракта обеспечивают крепление нагревателя и встраивание устройства нагрева в дыхательный тракт; второй  $l_2$  – нагреватель; четвертый  $l_4$  – гофрированная резиновая трубка, соединяющая лицевую часть модели с рабочей частью. Расчет температуры  $T_{s.4}(d_{inh}, l_1, l_2, l_3)$  выполняется при последовательном расчете температуры ГДС для каждого участка.

Для участков  $l_1$ ,  $l_3$ ,  $l_4$  температура вычисляется при решении системы уравнений для поля температуры в потоке ГДС, движущемся по каналу, и поля температуры в стенке канала:

$$\frac{\partial T_{s,1,3,4}}{\partial \tau} + \frac{G(\tau)}{S_p} \frac{\partial T_{s,1,3,4}(x,\tau)}{\partial x} = \alpha \frac{\pi dl}{S_{pc}} (t_{w,k}(x,r_0,\tau) - T_{s,k}(x,\tau)); \qquad (9)$$

191



Рис. 3. Определяющие конструктивные размеры рабочей части функциональной модели

$$T_{s.1,3,4}(x,0) = T_{s.1,3,4}(x,\tau_{i-1});$$
(10)

$$\begin{cases} T_{s.1}(0,\tau) = T_{env.2} \text{ (стадия вдоха)}, \ T_{s.1}(l_1,\tau) = T_{s.2}(0,\tau) \text{ (стадия выдоха)}; \\ T_{s.3}(0,\tau) = T_{s.2}(0,\tau) \text{ (стадия вдоха)}, \ T_{s.3}(l_3,\tau) = T_{s.4}(0,\tau) \text{ (стадия выдоха)}; \ (11) \\ T_{s.4}(0,\tau) = T_{s.3}(0,\tau) \text{ (стадия вдоха)}, \ T_{s.4}(l_4,\tau) = 36,6 \text{ (стадия выдоха)}; \end{cases}$$

$$\frac{\partial t_{w.1, 3, 4}(x, r, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_1^2 \left( \frac{\partial^2 t_{w.1, 3, 4}(x, r, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{w.1, 3, 4}(x, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{w.1, 3, 4}(x, r, \tau)}{\partial r} \right); (12)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w.1,3,4}(x,r_0,\tau)}{\partial r} - \alpha (t_{w.1,3,4}(x,r,\tau) - T_{s.1,3,4}(x,r,\tau)) = 0; \qquad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w,1,3}(x,r_1,\tau)}{\partial r} + \alpha_{env,1} (t_{w,1,3}(x,r_1,\tau) - T_{env,1}(\tau)) = 0; \qquad (14)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w.1}(0, r, \tau)}{\partial x} + \alpha_{env.1}(t_{w.1}(0, r, \tau) - T_{env.1}(\tau)) = 0; \qquad (15)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_{w.4}(x, r_1, \tau)}{\partial r} + \alpha_{env.2} (t_{w.4}(x, r_1, \tau) - T_{env.2}) = 0; \qquad (16)$$

$$t_{w.1}(l_1, r, \tau) = T_{heat};$$
 (17)

$$t_{w,3}(l_3, r, \tau) = t_{w,4}(0, r, \tau);$$
(18)

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w,3}(l_3, r_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_{w,4}(0, r_1, \tau)}{\partial x}, \quad t_{w,3}(l_3, r, \tau) = t_{w,4}(0, r, \tau);$$
(19)

$$\lambda_2 \frac{\partial t_{w.4}(x, r_1, \tau)}{\partial x} + \alpha_{env.2} (t_{w.4}(l_4, r, \tau) - T_{env.2}) = 0; \qquad (20)$$

192

$$\overline{t_{w.1,3}}(\tau) = \int_{0}^{l} \int_{r_0}^{r_1} t_{w.1,3}(x, r_1, \tau) dr dx; \qquad (21)$$

$$\frac{V_c}{S}\frac{\partial T_{env.1}(\tau)}{\partial \tau} = \alpha_{env.1}\left(\overline{t_{w.1,2,3}}(\tau) - T_{env.1}(\tau)\right), \ x \in (0, l_1);$$
(22)

$$T_{env.1}(0) = T_{env.1}(\tau_{i-1}), \tag{23}$$

где  $t_{w.1}(x, r, \tau)$  – температура стенки тракта на участке  $l_1$ , по которому движется ГДС;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности стенок дыхательного тракта на участках  $l_1, l_3$  и  $l_4$  соответственно;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при движении ГДС по участкам тракта;  $\alpha_{env.1}, \alpha_{env.2}$  – коэффициенты теплоотдачи от стенок участков дыхательного тракта к воздуху в объеме, ограниченном обечайкой регенеративного патрона, и в окружающую среду соответственно;  $\tau_{i-1}$  – предыдущий момент времени для которого выполнялся расчет;  $\overline{t_{w.1}}(\tau)$  – средняя интегральная температура внешней поверхности стенки канала по длине.

Для участка *l*<sub>2</sub> температура *T*<sub>s.2</sub> вычисляется следующим образом:

– для стадии вдоха уравнение (24) решается относительно  $T_{s,2}(l_2, \tau_i)$ 

$$\overline{G}c(T_{s,2}(l_2,\tau_i) - T_{s,2}(0,\tau_i)) = \alpha F(T_{heat} - T_{s,2}(l_2,\tau_i)), T_{s,2}(0,\tau_i) = T_{s,1}(l_1,\tau_i); \quad (24)$$

– для стадии выдоха уравнение (25) решается относительно  $T_{s,2}(0, \tau_i)$ 

$$\overline{G}c(T_{s,2}(0,\tau_i) - T_{s,2}(l_2,\tau_i)) = \alpha F(T_{heat} - T_{s,2}(0,\tau_i)), T_{s,2}(l_2,\tau_i) = T_{s,3}(0,\tau_i), \quad (25)$$

где  $\overline{G}$  – средний расход за время такта вдоха и выдоха; c – теплоемкость газовой дыхательной смеси; F – площадь теплообмена нагревателя;  $T_{heat}$  – температура нагревателя;  $\tau_i$  – текущий интервал времени (или такт вдоха/выдоха), для которого проводится расчет.

При этом также учитывается нагрев воздуха, находящегося в объеме обечайки, в соответствии с уравнениями (22), (23) для  $x \in (0, l_2)$ .

Для расчета искомой функции температуры  $T_{s,4}(x, \tau)$  использованы аналитические решения задачи теплопроводности для полого ограниченного цилиндра с функционально меняющейся температурой окружающей среды со стороны боковых поверхностей и дифференциального уравнения переноса тепла потоком ГДС, движущейся в режиме идеального вытеснения по каналу с учетом переноса тепла теплопроводностью.

Решение сформулированной задачи структурно-параметрического синтеза обеспечивает поиск варианта конструкции K и его определяющих конструктивных параметров  $d_{inh}$ ,  $d_{exh}$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ . Для ее решения в работе предложен двухэтапный алгоритм.

Первый этап предполагает поиск вариантов конструкции, которые удовлетворяют ограничению (2) на стоимость изготовления модели. Он осуществляется в рамках множества готовых, уже разработанных ранее, конструктивных решений. Среди всего множества существующих вариантов конструкции выбирается такой, значение стоимости изготовления которого меньше значения  $S_t$ , заданного в ограничении, и находится ближе всего к этому значению. На втором этапе для него выполняется поиск определяющих конструктивных параметров модели  $d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3$ . В данном случае для решения задачи определен метод покоординатного спуска с ограничениями ввиду его надежности и отсутствия необходимости использования дополнительных математических преобразований.

#### Результаты выполненных экспериментальных исследований разработанных вариантов конструкций элементов функциональной модели

На рисунке 4 показана конструкция заслонки лепесткового типа, где изменение диаметра проходного сечения тракта обеспечивается лепестковой диафрагмой. На рисунке 5 представлены зависимости сопротивления вдоху и выдоху от степени открытия заслонки для легочных вентиляций 35 и 70 л/мин:

$$y_1(a) = -0,0008a^3 - 0,1442a^2 + 11,617a + 537,61;$$
  

$$y_2(a) = 0,0011a^3 - 0,1909a^2 + 13,109a + 134,66;$$
  

$$y_3(a) = -0,0015a^3 + 0,203a^2 - 12,028a - 169,3;$$
  

$$y_4(a) = -0,0018a^3 + 0,2707a^2 - 17,079a - 571,74.$$



Рис. 4. Конструкция заслонки лепесткового типа





194

Сформулированная задача структурно-параметрического синтеза определяет диаметры дыхательных трактов как варьируемые переменные. Для получения зависимости сопротивления дыханию от угла поворота заслонки и диаметра дыхательного тракта предложен метод, при котором необходимая для решения задачи структурно-параметрического синтеза зависимость  $\Delta p(d, \alpha_j)$  представлялась

произведением двух функций

$$\Delta p(d, \alpha_j) = s(d)y(a), \qquad (26)$$

где s(d) – функция сопротивления дыханию от диаметра дыхательного тракта; y(a) – определенная ранее функция сопротивления дыханию, в зависимости от степени открытия заслонки, для дыхательного тракта диаметром 0,025 м

Исследования проводились для следующих значений диаметра дыхательной трубки, м: 0,005; 0,009; 0,013; 0,017; 0,021; 0,025 и легочной вентиляции 35 и 70 л/мин. На рисунке 6 представлены графики полученных зависимостей изменения сопротивления вдоху и выдоху для легочной вентиляции 35 и 70 л/мин соответственно:

$$y_1 = 2,3026e^{-35,54x}; \quad y_2 = 5,286e^{-66,43x}.$$

После получения зависимостей s(d) была проверена точность расчета значений сопротивления дыханию в зависимости от диаметра дыхательного тракта и степени открытия заслонки при использовании предложенного метода представления функции  $\Delta p(d, \alpha)$  как произведения двух функций s(d) и y(a).

Ошибка вычислений, согласно предложенному методу, составила 15 %. Полученное значение погрешности не превышает привносимую критериальными уравнениями, которые используются при вычислении значений критерия. Результаты представлены в табл. 1.



Рис. 6. Зависимость сопротивления вдоху 1 и выдоху 2 от диаметра дыхательного тракта

Таблица 1

Сравнение эксперимен	гальных и	расчетных	значений
сопроти	вления ды	хания	

Легочная вентиляция	$\Delta P_{\rm изм},$ Па	$\Delta P_{\rm pacч},$ Па	$\Delta P_{\rm изм} - \Delta P_{\rm pacч}, \Pi a$
35 л/мин	150	171	21
70 л/мин	380	437	57

ISSN 0136-5835. Вестник ТГТУ. 2020. Том 26. № 2. Transactions TSTU

В работе проанализированы варианты нагревателей, на основе которых может быть выполнено устройство нагрева ГДС. По результатам экспериментальных исследований различных вариантов конструкций нагревателей, проведенных на установке «ИЛ» определено, что все они обеспечивают схожие параметры нагрева ГДС. Поэтому решение о выборе варианта нагревателя принималось на основе удобства установки нагревательного элемента, в результате чего был выбран метод нагрева с помощью керамического нагревателя.

На установке «ИЛ» выполнено определение зависимостей характеристик ИДА, таких как  $T(\tau_i)$ ,  $\Delta P_{inh,i}(\tau_i)$ ,  $\Delta P_{exh,i}(\tau_i)$  (рис. 7).

В процессе решения задачи структурно-параметрического синтеза зависимости  $T(\tau_i)$ ,  $\Delta P_{inh,i}(\tau_i)$ ,  $\Delta P_{exh,i}(\tau_i)$  представлялись в табличном виде.

Ограничения и пределы изменения значений составляющих критерия оптимальности определены на основе особенностей использования самоспасателя, его конструктивных характеристик и внешнего вида рабочей части.

Ограничение на стоимость изготовления модели определено из стоимости самоспасателя ШСС-ТМ и ресурса эксплуатации модели



$$S(K) \le 220\ 000\ p.$$

(27)



Рис. 7. Зависимости изменения сопротивления вдоху, выдоху (*a*) и температуры газовой дыхательной смеси (б) для самоспасателя ШСС-ТМ

Ограничение на массу модели определено исходя из значения массы самоспасателя ШСС-ТМ, приведенным в боевое положение  $M_d = 3$  кг:

$$M(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}) = 3$$
 кг.

Ограничения на эквивалентность внешнего вида модели внешнему виду дыхательного аппарата определяются двумя типами ограничений – на геометрические параметры обечайки модели и ее воздуховодной системы.

$$Q(K, \{K_1, K_2, ..., K_m\}) \le (K, \{K_1 = 143 \text{ мм}, K_2 = 183 \text{ мм}, K_3 = 76 \text{ мм}\}).$$
(28)

Геометрические параметры воздуховодной системы модели определены также измерением основных размеров

$$J(K, \{K_1, K_2, ..., K_m\}) = (K_1 = 20 \text{ MM}, K_2 = 210 \text{ MM}).$$
(29)

Значения пределов изменения составляющих критерия оптимальности:

$$T_0 = 36 \text{ °C}; T_1 = 55 \text{ °C}; \Delta P_0 = 300 \text{ }\Pi a; \Delta P_1 = 1000 \text{ }\Pi a.$$

Вариант конструкции модели самоспасателя ШСС-ТМ представлен на рис. 8. В его основу положена конструкция устройства моделирования сопротивления дыханию на основе лепестковой диафрагмы и конструкция устройства нагрева на основе керамического нагревателя.

Устройство моделирования сопротивления дыханию состоит из привода, управляемого блоком управления, орбитальной зубчатой передачи и запорного элемента в виде лепестков, перекрывающего сечение.

Стоимость изготовления разработанной для функциональной модели конструкции без разделения трактов вдоха и выдоха составила 140 500 р., с разделением – 236 000 р. Второй вариант выходит за рамки определенного ограничения.

Далее выполнялся поиск конструктивных параметров полученной конструкции. В таблице 2 представлены результаты расчета критерия оптимальности для различных значений варьируемых параметров.

Исходя из полученных в результате решения оптимизационной задачи значений основных параметров конструкции могут быть определены конструктивные характеристики ее элементов и их взаимосвязь.



Рис. 8. Конструкция элементов функциональной модели самоспасателя ШСС-ТМ: *a* – общий вид; *δ* – механизм привода лепестков, ограничивающих проходное сечение дыхательного тракта

Значения варьируемых переменных			Значение критерия		
$d_{inh}$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	оптимальности	
0,005	0,010	0,010	0,01	0,53	
0,010	0,010	0,010	0,01	0,47	
0,015	0,010	0,010	0,01	0,42	
0,020	0,015	0,015	0,015	0,38	
0,020	0,015	0,020	0,015	0,34	
0,020	0,015	0,025	0,015	0,29	
0,020	0,020	0,025	0,020	0,25	
0,020	0,020	0,030	0,020	0,23	
0,020	0,020	0,035	0,020	0,26	

Рассчитанные значения критерия

#### Заключение

По результатам проведенных расчетов определены режимные и конструктивные факторы ИДА, оказывающие влияние на человека. Проанализирована степень влияния ответа человеческого организма на каждый из определенных факторов на эффективность работы ИДА. Сформулированы требования к функциональным моделям ИДА и задача их структурно-параметрического синтеза, обеспечивающая поиск варианта конструкции и его определяющих конструктивных параметров в зависимости от типа и назначения моделируемого ИДА, при минимальном отличии зависимостей изменения температуры ГДС и сопротивления дыханию, воспроизводимых моделью и дыхательным аппаратом в течение времени их работы.

Разработан двухэтапный алгоритм решения задачи структурно-параметрического синтеза, обеспечивающий, на первом этапе, выбор оптимального варианта конструкции с точки зрения его стоимости, на втором – поиск значений определяющих конструктивных параметров найденного варианта. Разработан метод получения эксплуатационных характеристик ИДА для параметрической идентификации функциональной модели в процессах постановки и решения задачи структурно-параметрического синтеза, в основу которого положено дополнение установки «ИЛ» автоматизированной системой регистрации параметров работы дыхательных аппаратов. Ее использование позволило повысить точность результатов исследований ИДА на установках «ИЛ» в среднем в 7 раз.

Разработаны варианты конструкций устройств моделирования сопротивления дыханию и нагрева газовой дыхательной смеси и на их основе конструкции функциональной модели – с разделением и без разделения трактов вдоха и выдоха. Показано, что большую точность обеспечивает модель с разделенными трактами, при этом стоимость ее изготовления выше в 1,68 раза по сравнению с конструкцией без разделения трактов. Выполнено экспериментальное исследование сопротивления вдоху и выдоху для разработанных вариантов конструкций устройств моделирования сопротивления дыханию. Для каждого варианта конструкции получены аппроксимационные зависимости сопротивления вдоху и выдоху от степени открытия проходного сечения дыхательного тракта и его диаметра для значений легочной вентиляции 35 л/мин и 70 л/мин. Сформулирована и решена задача структурно-параметрического синтеза функциональной модели самоспасателя ШСС-ТМ. Исследования могут быть продолжены в направлении дальнейшей формализации системных связей элементов функциональной модели для возможности повышения степени автоматизации процесса ее синтеза.

#### Список литературы

1. Холдэн, Дж. С. Дыхание / Дж. С. Холдэн, Дж. Г. Пристли ; пер. с англ. Е. М. Беркович, Л. М. Модель ; под ред. М. Е. Маршака. – М. – Л. : Биомедгиз, 1937. – 461 с.

2. Диденко, Н. С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н. С. Диденко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1990. – 156 с.

3. Структурно-параметрический синтез системы поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации тепло- и массообменного оборудования / Е. Н. Малыгин, М. Н. Краснянский, Е. Н. Туголуков, С. Ю. Алексеев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-а. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 350 – 359. doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.350-359

4. Mobile Robots in Mine Rescue and Recovery / R. R. Murphy J. Kravitz, S. Stover, R. Shoureshi // IEEE Robotics & Automation Magazine. -2009. - Vol. 16, No. 2. - P. 91 - 103.

5. Немцев, А. В. Актуальные вопросы применения изолирующих промышленных самоспасателей. Часть 1. Самоспасатели на химически связанном кислороде / А. В. Немцев, Э. М. Вэстморлэнд // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 2. – С. 62 – 66.

6. Development of Algorithmic and Mathematical Support of Adaptive Training Complexes / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. A. Obukhov [et al.] // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 02 – 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria. – Sofia, 2018. – Vol. 18. – P. 279 – 286.

7. New Mobile Wireless Imitator of Mine Insulating Self-Rescuer / S. Karpov, A. Glebov, S. Alexeev [et al.] // Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 02 – 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria. – Sofia, 2018. – Vol. 18. – P. 33 – 40.

### Structural and Parametric Synthesis of Functional Models of Self-Contained Breathing Apparatus

S. Yu. Alekseev<sup>1</sup>, A. Yu. Zakharov<sup>2</sup>

"Corporation Roskhimzashchita" OJSC (1), sergei.alexeev-dt@yandex.ru; Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering" (2), nemtinov@mail.gaps.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** self-contained breathing apparatus; system of imitation of breathing processes; structural-parametric synthesis; training complexes.

**Abstract:** Based on the analysis of factors affecting a person when using self-contained breathing apparatus, the problem of structural and parametric synthesis of functional models of breathing apparatus is formulated, the solution of which ensures

the minimum deviation of the mode characteristics of the model from the mode characteristics of the device. An algorithm is developed for solving the formulated problem, a method for determining the dependences of changes in the parameters of the respiratory apparatus over time, to determine possible design options for common elements. The solution of the formulated problem of structurally parametric synthesis is illustrated by the example of the functional model of the ShSS-TM self-rescuer.

#### References

1. Kholden Dzh.S., Pristli Dzh.G., Marshak M.Ye. [Ed.] *Dykhaniye* [Breath], Moscow - Leningrad: Biomedgiz, 1937, 461 c. (In Russ.)

2. Didenko N.S. *Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatel'nykh rabot* [Regenerative respirators for mine rescue], Moscow: Nedra, 1990, 156 p. (In Russ.)

3. Malygin Ye.N., Krasnyanskiy M.N., Tugolukov Ye.N., Alekseyev S.Yu. [Structural and parametric synthesis of a decision support system for the design and operation of heat and mass transfer equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 350-359, doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.350-359 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Murphy R.R., Kravitz J., Stover S., Shoureshi R. Mobile Robots in Mine Rescue and Recovery, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 91-103.

5. Nemtsev A.V., Vestmorlend E.M. [Actual issues of the use of insulating industrial self-rescuers. Part 1. Self-rescuers on chemically bound oxygen], *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry], 2013, no. 2, pp. 62-66. (In Russ.)

6. Dedov D.L., Krasnyanskiy M.N., Obukhov A.A., Alexeev S.Yu., Zakharov A.Yu. Development of Algorithmic and Mathematical Support of Adaptive Training Complexes, *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 02 - 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria, Sofia, 2018, vol. 18, pp. 279-286.

7. Karpov S., Glebov A., Alexeev S., Arkhipov A., Siukhin A. New Mobile Wireless Imitator of Mine Insulating Self-Rescuer, *Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 02 - 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria, Sofia, 2018, vol. 18, pp. 33-40.

# Struktur-parametrische Synthese von Funktionsmodellen der isolierenden Atemschutzgeräte

**Zusammenfassung:** Basierend auf der Analyse von Faktoren, die eine Person bei Verwendung des Atemgeräts beeinflussen, ist das Problem der strukturellen und parametrischen Synthese von Funktionsmodellen der Atemgeräte formuliert, deren Lösung die minimale Abweichung der Modenmerkmale des Modells von den Modenmerkmalen des Geräts sicherstellt. Es ist ein Algorithmus zur Lösung des formulierten Problems entwickelt, ein Verfahren zur Bestimmung der Abhängigkeiten von Änderungen der Parameter des Atemgeräts in der Zeit, um mögliche Entwurfsoptionen für gemeinsame Elemente zu bestimmen. Die Lösung des formulierten Problems der strukturparametrischen Synthese ist am Beispiel des Funktionsmodells des ShSS-TM-Selbstretters veranschaulicht.

# Synthèse structuro-paramétrique des modèles fonctionnels d'appareils respiratoires

**Résumé:** A la base de l'analyse des facteurs qui affectent une personne lors de l'utilisation d'un appareil respiratoire, est formulé le problème de la synthèse structurelle et paramétrique des modèles fonctionnels d'appareils respiratoires dont la solution garantit une déviation minimale des caractéristiques de régime du modèle par rapport aux caractéristiques de régime de l'appareil. Sont élaborés un algorithme pour résoudre le problème formulé, une méthode pour déterminer les dépendances de la modification des paramètres de l'appareil respiratoire dans le temps, permettant de déterminer les variantes possibles de la conception des éléments communs. La solution du problème formulé de la synthèse structurellement paramétrique est illustrée par l'exemple du modèle fonctionnel de l'auto-sauveteur ChSS-TM.

Авторы: Алексеев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, начальник сектора автоматизированных систем, АО «Корпорация «Росхимзащита»; Захаров Александр Юрьевич – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: Литовка Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.