

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ «ИСКУССТВЕННЫЕ ЛЕГКИЕ»

П.М. Оневский¹, А.Ю. Годымчук², А.М. Иванов¹

*Кафедры: «Информационные процессы и управление»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); onev1@mail.ru;
«Наноматериалы и нанотехнологии», ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск (2)*

Представлена членом редколлегии профессором В.Г. Матвейкиным

Ключевые слова и фразы: искусственные легкие; оптимальное управление; потребление кислорода; прогнозирующий алгоритм.

Аннотация: Разработана структура прогнозирующей системы управления комплексом «Искусственные легкие». Предложен алгоритм оптимального управления подачей и удалением газов из искусственных легких с целью имитации потребления кислорода.

Индивидуальные дыхательные аппараты (ИДА) для защиты органов дыхания изолирующего типа с химически связанным кислородом используются в различных областях в экстремальных ситуациях: на земле и под землей, в космосе и на транспорте, на воде и под водой.

Поскольку испытание ИДА на людях в силу многих причин возможно лишь в ограниченном объеме и в ряде случаев небезопасно, такие испытания целесообразно проводить на специализированных комплексах, называемых «Искусственные легкие» (ИЛ).

В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается автоматизированный комплекс ИЛ, в котором имитация потребления кислорода осуществляется путем сброса в атмосферу рассчитываемого объема газовой воздушной смеси (ГДС) с одновременной подачей азота и диоксида углерода в тех количествах, которые удаляются при сбросе ГДС в атмосферу [1]. Предполагается, что в ИЛ циркулирует трехкомпонентная смесь газов O_2 , CO_2 , N_2 . Для сброса ГДС в данном комплексе предполагается использовать поршневой дозатор с линейным электрическим приводом, а для подачи азота и диоксида углерода – регулируемые клапаны. Эти устройства должны работать синхронно с приводом имитатора дыхания, который воспроизводит различные пневмотахограммы дыхания (синусоидальную, треугольную, трапецеидальную) с заданной частотой и глубиной, причем сброс ГДС и подача соответствующих газов производится на фазе вдоха. Поскольку при испытаниях ИДА в комплексе ИЛ измерения концентраций вдыхаемых и выдыхаемых газов производится газоанализаторами, обладающими некоторым запаздыванием и ошибками, в системе управления комплекса ИЛ целесообразно предусмотреть прогнозирование концентраций газов и объемов сброса и подачи в имитатор дыхания соответствующих газов на определенный интервал времени. Кроме того, необходимо обеспечить точное воспроизведение объемов сброса ГДС и подачи азота и диоксида углерода на каждом цикле вдоха-выдоха. При неточном воспроизведении данных объемов с течением времени накаплива-

ются ошибки, которые приводят к неадекватной имитации потребления кислорода и снижают качество проведенных испытаний ИДА.

Целью данной работы является постановка задачи оптимального управления комплексом ИЛ и разработка алгоритма управления исполнительными устройствами, обеспечивающего минимизацию ошибок воспроизведения заданных объемов газов.

На рисунке 1 приведена упрощенная структурная схема системы управления комплексом «Искусственные легкие». Рассмотрим принцип работы системы управления. Процесс функционирования системы разбивается на циклы. На каждом цикле коррекции необходимых объемов сброса ГДС и подачи CO_2 и N_2 осуществляется прогнозирование состояния системы на определенный интервал времени T . На основании заданного режима испытаний (частоты n , глубины V_d и коэффициента дыхания K_d , вида пневмотахограммы ПТГ и потока $W_{\text{CO}_2}(0)$, имитирующего выделение человеком диоксида углерода) и измеренных значений концентраций вдыхаемых газов $C_{\text{CO}_2}^{\text{вд}}$ и $C_{\text{O}_2}^{\text{вд}}$ задающая подсистема формирует в функции времени заданные значения объемов сброса ГДС $V_{\text{ГДС}}^{\text{зад}}(t)$ и подачи газов

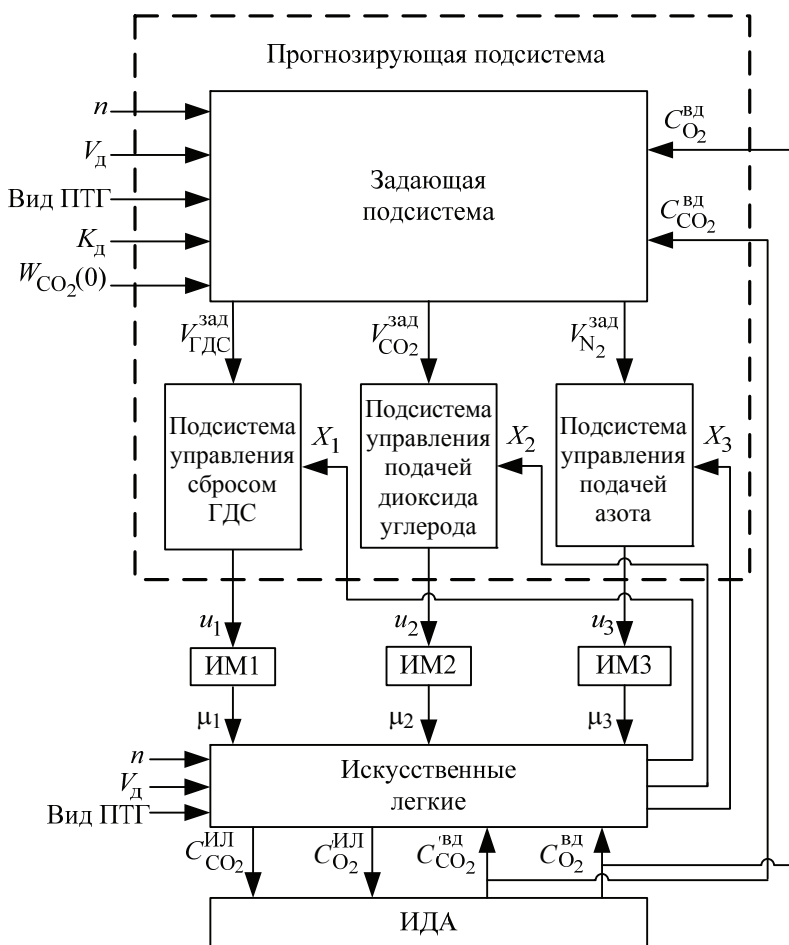


Рис. 1. Структурная схема системы управления комплексом «Искусственные легкие»

$V_{\text{CO}_2}^{\text{зад}}(t)$, $V_{\text{N}_2}^{\text{зад}}(t)$. Эти заданные значения объемов газов и текущий вектор состояния системы (X_1, X_2, X_3) используются в алгоритмах соответствующих подсистем управления для определения управляющих сигналов u_1, u_2, u_3 исполнительными механизмами ИМ1, ИМ2, ИМ3, непосредственно удаляющими ГДС и подающими CO_2 и N_2 .

Для построения алгоритмов управления исполнительными механизмами, обеспечивающих минимизацию ошибок воспроизведения заданных объемов газов, воспользуемся методом аналитического конструирования оптимальных регуляторов по критерию обобщенной работы [2]. На основе данного метода разработаны алгоритмы оптимального управления нелинейными динамическими объектами, способные функционировать в реальном масштабе времени. Используем прогнозирующий алгоритм на скользящем интервале оптимизации с вычислением матрицы чувствительности [3].

Пусть математическая модель объекта управления описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\dot{x} = f(x, y, t), \quad \dot{y} = u, \quad x(0) = x_0, \quad y(0) = y_0, \quad (1)$$

где x – вектор состояния объекта управления; f – дифференцируемая по всем аргументам нелинейная вектор-функция; y – вектор управляющих воздействий; u – скорость изменения y .

В модели (1) управление осуществляется изменением скорости воздействий y , а $x = x(y, t)$ – сложная функция.

Требуется найти управление, минимизирующее функционал обобщенной работы на скользящем интервале (t_u, t_u+T) ,

$$I = \int_{t_u}^{t_u+T} Q(x, y, \tau) d\tau + \frac{1}{2} \int_{t_u}^{t_u+T} (u^T K^{-1} u + u_{\text{оп}}^T K^{-1} u_{\text{оп}}) d\tau, \quad (2)$$

где Q – дифференцируемая по своим аргументам скалярная функция, характеризующая качество процесса управления на интервале (t_u, t_u+T) ; K – диагональная матрица коэффициентов эффективности управлений; $u_{\text{оп}}$ – оптимальная скорость изменения y (оптимальное управление); t_u – момент определения управляющих воздействий; T – интервал прогнозирования.

Согласно [2, 3], управление $u_{\text{оп}}$ определяется из выражения

$$u_{\text{оп}}(t_u) = -K \frac{\partial V(t_u)}{\partial y(t_u)}, \quad (3)$$

где $V(t)$ – решение уравнения Ляпунова

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(x_c, t) = -Q(x_c, t), \quad V(t_u + T) = 0, \quad (4)$$

на свободном движении объекта (1) на интервале (t_u, t_u+T) :

$$\dot{x}_c = f(x_c, y, t), \quad \dot{y} = 0. \quad (5)$$

На свободном движении (5) левая часть (4) превращается в полную производную по t

$$\dot{V} = -Q(x_c, t), \quad V(t+T) = 0. \quad (6)$$

Дифференцируя (6) по y по правилу дифференцирования сложной функции, получим [3]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V(t_u)}{\partial y(t_u)} \right) = - \frac{\partial Q(t)}{\partial x_c} \frac{\partial x_c(t)}{\partial y(t_u)} - \frac{\partial Q(t)}{\partial y(t_u)}, \quad (7)$$

где $\frac{\partial x_c(t)}{\partial y(t_u)} = Z(t)$ – матрица чувствительности решения уравнения (5) по вектору параметров y , удовлетворяющая уравнению чувствительности

$$\dot{Z}(t) = \frac{\partial f(x_c, y, t)}{\partial x_c(t)} Z(t) + \frac{\partial f(x_c, y, t)}{\partial y(t_u)} \quad (8)$$

с начальным условием

$$Z(t_u) = 0, \quad (9)$$

где матрицы Якоби $\frac{\partial f(x_c, y, t)}{\partial x_c(t)}$, $\frac{\partial f(x_c, y, t)}{\partial y(t_u)}$ вычисляются на $x_c(t)$.

Блок-схема алгоритма управления представлена на рис. 2.

Функционирование алгоритма осуществляется следующим образом. На каждом цикле коррекции управлений информация о переменных состояния объекта управления (сигналы с измерителей) поступают в систему оценивания, где осуществляется оценка вектора состояния системы (фильтрация шумов и восстановление координат вектора x , не доступных измерению). Оценки вектора состояния \hat{x} , \hat{y} поступают в прогнозирующую модель. Управляющие сигналы для объекта (1) вычисляются по формуле (3) в моменты времени t_u с периодичностью $\Delta t_{\text{ц}}$, где $\Delta t_{\text{ц}}$ – цикл коррекции управлений. Оптимальное управление $u_{\text{оп}}(t_u)$ вычисляется на каждом цикле путем интегрирования на интервале $(t_u, t_u + T)$ уравнений прогнозирующей модели (5), (7) и (8).

Рассмотрим реализацию предложенного алгоритма для подсистемы управления сбросом ГДС. Предположим, что система оценивания (в данном примере не рассматривается) осуществляет точную оценку вектора состояния X_1 , шумы датчиков (на рис. 1 не показаны) отсутствуют. Составим уравнения, реализующие предложенный алгоритм.

Пусть математическая модель объекта управления в соответствии с (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dV_{\text{ГДС}}}{dt} &= S_{\text{п}} \vartheta \pi \sin(2\pi n t); \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{1}{T_{\text{д}}} (-\vartheta + k_{\text{д}} \mu_{\text{пер}}), \quad |\vartheta| \leq \vartheta^{\text{max}}; \\ \frac{d\mu_{\text{пер}}}{dt} &= u_1, \quad |\mu_{\text{пер}}| \leq \mu_{\text{пер}}^{\text{max}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $V_{\text{ГДС}}$ – объем ГДС, удаляемый из системы на фазе вдоха; ϑ – скорость движения штока линейного привода; $\mu_{\text{пер}}$ – управляющий сигнал; u_1 – скорость изменения управляющего сигнала (управление); $S_{\text{п}}$ – площадь поршня поршневого дозатора; $T_{\text{д}}$, $k_{\text{д}}$ – параметры модели привода.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления

Минимизируемый критерий качества управления объектом (10) примем в виде

$$I = \frac{1}{2} \int_{t_u}^{t_u+T} [\alpha(V_{\text{ГДС}} - V_{\text{ГДС}}^{\text{зад}})^2 + \beta(\dot{V}_{\text{ГДС}})^2] d\tau + \frac{1}{2} \int_{t_u}^{t_u+T} (k^{-1}u^2 + k^{-1}u_{\text{оп}}^2) d\tau, \quad (11)$$

где α, β – весовые коэффициенты, варьируя которые можно обеспечить заданное качество переходного процесса; k – коэффициент эффективности управлений.

Оптимальное управление вида (3) определяется выражением

$$u_{\text{оп}}(t_u) = -k \frac{\partial V(t_u)}{\partial \mu_{\text{пер}}(t_u)}. \quad (12)$$

Прогнозирующая модель состоит из уравнений свободного движения объекта вида (5):

$$\begin{aligned} \frac{dV_{\text{ГДС}}}{d\tau} &= S_{\text{п}} \vartheta \pi \sin(2\pi n t); \\ \frac{d\vartheta}{d\tau} &= \frac{1}{T_{\text{д}}} (-\vartheta + k_{\text{д}} \mu_{\text{пер}}); \\ \frac{d\mu_{\text{пер}}}{d\tau} &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

из уравнений чувствительности вида (8):

$$\begin{aligned} \frac{dZ_1}{d\tau} &= S_{\text{п}} \pi \sin(2\pi n t) Z_2; \\ \frac{dZ_2}{d\tau} &= -\frac{1}{T_{\text{д}}} Z_2 + \frac{k_{\text{д}}}{T_{\text{д}}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $Z_1 = \frac{\partial V_{\text{ГДС}}}{\partial \mu_{\text{пер}}}$; $Z_2 = \frac{\partial \vartheta}{\partial \mu_{\text{пер}}}$ – функции чувствительности,

из уравнения для частной производной функции Ляпунова вида (7):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial \mu_{\text{пер}}} \right) = -\alpha (V_{\text{ГДС}} - V_{\text{ГДС}}^{\text{зад}}) Z_1 - \beta \dot{V}_{\text{ГДС}} S_{\text{п}} \pi \sin(2\pi n t) Z_2. \quad (15)$$

Уравнения (14), (15) интегрируются на интервале (t_u, t_u+T) при нулевых начальных условиях, а система (13) интегрируется с начальными условиями, соответствующими текущему состоянию объекта (10) в конце предыдущего цикла $\Delta t_{\text{ц}}$ коррекции управления.

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволит управлять газовыми объемами в ИЛ с заданной точностью и с минимальными затратами энергии на управление.

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

1. Гудков, С.В. Совершенствование методики испытания изолирующих дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом / С.В. Гудков, Д.С. Дворецкий, А.Ю. Хромов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 589–597.

2. Красовский, А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами / А.А. Красовский, В.Н. Буков, В.С. Шендрик. – М. : Наука, 1977. – 274 с.

3. Буков, В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / В.Н. Буков. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.

Statement of the Problem of Optimal Control over Testing “Artificial Lungs”

P.M. Onevsky¹, A.Yu. Godymchuk², A.M. Ivanov¹

*Departments: “Information Processes and Control”, TSTU (1); onev1@mail.ru;
“Nanomaterials and Nanotechnology”, Tomsk National Research
Polytechnic University, Tomsk (2)*

Key words and phrases: artificial lungs; optimal control; oxygen consumption; prediction algorithm.

Abstract: The paper describes the structure of predictive system to control “Artificial lungs”. An algorithm for optimal control over feeding and removing of gases from the artificial lungs to simulate oxygen consumption has been proposed.

Aufgabenstellung der optimalen Steuerung vom Testkomplex «künstliche Lungen»

Zusammenfassung: Es ist die Struktur des vorhersagenden Steuersystemes der Komplex «Künstliche Lungen» entwickelt. Es ist den Algorithmus der optimalen Steuerung von der Abgabe und der Entfernung der Gase aus den künstlichen Lungen zwecks der Imitation des Verbrauches des Sauerstoffs angeboten.

Mise du problème de la commande optimale du complexe d’essais «Poumons artificiels»

Résumé: Est élaborée la structure du système de prévision de la commande du complexe d’essais «Poumons artificiels». Est proposé un algorithme de la commande optimale du débit et de l’évacuation des gaz à partir des poumons artificiels dans le but de l’imitation de la consommation de l’oxygène.

Авторы: *Оневский Павел Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Годымчук Анна Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Наноматериалы и нанотехнологии», ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск; *Иванов Андрей Михайлович* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
