

УДК 621.452.32

## РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВОЛНОВЫХ УРАВНЕНИЙ ГТД КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

Г.Г. Куликов<sup>1</sup>, И.М. Горюнов<sup>2</sup>, В.А. Шукалюк<sup>3</sup>, А.В. Афанасьева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>[gennadyg\\_98@yahoo.com](mailto:gennadyg_98@yahoo.com)

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия

<sup>3,4</sup> АО НПП «Аэросила», г. Уфа, Россия,

*Поступила в редакцию 16.11.2023*

**Аннотация.** Рассматривается системно-семантический подход к формированию автоматизированного метода идентификации структуры и термогазодинамических параметров системы волновых моделей базовых узлов в составе газотурбинного двигателя (ГТД) на основе его 4D – 1D компьютерных моделей. Показано, что данный подход позволяет обеспечить требуемый уровень расширения и формализации знаний в форме множества системных моделей цифровых двойников (ЦД) реальных и виртуальных объектов и их процессов с сохранением их причинно-следственных связей. Расширяется логика представления элементов системных моделей узлов ГТД в пространственно-временном базисе Минковского на основе их волновых функций. Показана объективная необходимость формирования и применения, предметно-ориентированного формального (порождающего) метаязыка. Рассматривается пример применения данного подхода к идентификации структуры и параметров волновой модели осевого компрессора в составе ГТД как объекта управления и диагностики.

**Ключевые слова:** системный подход, системная модель ГТД, волновые уравнения, цифровой двойник, метаязык.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для создания сложных технических объектов необходимо использовать многоаспектные системно-теоретические знания в исследуемой предметной области (ИПО). Разработанные в материальной диалектике принципы и законы являются основой системной методологии и системных методов в практической деятельности в форме «инженерной диалектики» [1-6]. Определим в качестве ИПО методологические и методические аспекты разработки компьютерных термогазодинамических моделей как объектов управления, контроля и диагностики, и их применения при разработке систем автоматического управления, контроля и диагностики (САУКиД) класса систем с полной ответственностью (FADEC) [7-17].

Отметим, что если для системного проектирования замкнутых каналов управления САУКиД требования к динамическим моделям определяются существенным диапазоном частот ГТД и исполнительных механизмов (ИМ) как объекта управления и не превышают, как правило, 5–10 Гц, то по термогазодинамическим параметрам газовоздушного тракта (ГВТ) для контроля и диагностики резонансных явлений (при розжиге, горении, сжатии, расширении, помпаже, вибрациях и др.) необходимый диапазон существенных частот уже составляет килгерцы (кГц), определяемых характеристиками (длиной, амплитудой и др.) относительно

звуковых волн в потоке. Отметим, что в известных методах и моделях термогазодинамических расчетов дроссельных характеристик (ДХ) и высотно-скоростных характеристик (ВСХ) ГТД основные параметры потока также рассчитываются с относительно скорости звука. Таким образом, можно предположить, что скорость звука в потоке выполняет роль относительной инерциальной системы отсчета при расчете его параметров.

Статические и динамические модели таких процессов строятся, как правило, на основе теории уравнений Навью Стокса в частных производных и их дальнейшей трансформации в класс волновых уравнений при различных допущениях на физико-механические свойства потока газа (воздуха), граничных и начальных условиях, определяемых геометрией течения (конструкцией ГВТ) газа в узлах ГТД. Несложно показать, что при сохранении условия детерминизма (стационарности процессов течения) решения волновых уравнений будут соответствовать моделям ДХ и ВСХ (в терминологии теории волновых уравнений (ТВУ) стоячей волны в пространстве). В динамике же волновые уравнения как модель естественных (собственных) колебаний в потоке являются одним из основных генераторов, возбуждающих вибрации, высокочастотные колебания газа, помпажи, пульсационное горение и др., как это было отмечено выше.

Можно выделить три подхода к построению (конструированию) данного класса моделей:

- аналитический, на основе теории нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных математической физики и интерпретации их пространственной геометрии (конфигурации) в форме граничных условий и во временном (динамическом) пространстве в форме начальных условий с последующим их упрощением до системы дифференциальных уравнений с сосредоточенными параметрами в пространстве состояний;

- идентификационный, методами теории идентификации параметров модели путем планирования и проведения экспериментов на реальном объекте и на стендах или его нелинейной модели (в том числе и на модели расчета ВСХ и ДХ) и обработки полученных данных;

- комбинированный, виртуально-экспериментальный с применением аналитических методов, когда часть реальных данных получают путем имитации экспериментов на сложных моделях (полунатурных стендах), а параметры упрощенных моделей в форме системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений получают аналитическими методами (теория анализа больших данных).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определим необходимые и достаточные условия для проектирования (конструирования) структуры и метода решения волнового уравнения нестационарного газодинамического потока для компрессора как узла в системе ГТД и определения его параметров методом идентификации по данным, рассчитываемым по нелинейной термогазодинамической модели для установившегося (детерминированного) газового потока в ГТД.

Полагаем, что в объеме, определяемом площадью сечений  $S1(X1)$  на входе осевого компрессора (ОК) и  $S2(X2)$  на выходе ОК и длиной  $L$  в каждый момент времени находится определенное количество воздуха. Полагаем, что газодинамическое состояние этого объема воздуха определяется законами Ньютона, в частности, законом сохранения (неразрывности) определенной массы газа в системе координат продольного сечения ГТД. По второму закону Ньютона, силы, действующие на объем (массу) объекта на входе и выходе ОК, определяются как произведение площади на давление. С учетом эквивалентной силы, определяемой продольной составляющей механической энергии  $P_{мех}$ , суммарная продольная сила на объем от  $X1$  до  $X2$  равна нулю при стационарном потоке. Это означает, что силы внутри и снаружи объекта уравновешиваются.

Масса воздуха в ОК равна произведению его плотности на объем или произведению плотности на эквивалентную среднюю площадь и на длину. Определим ускорение данной массы как производную функции средней скорости от времени.

Введенные допущения определяют основные свойства волны, которая может возникать (генерироваться), прежде всего, за счет изменения локальной плотности и скорости течения воздуха (газа), так плотность сохраняет дифференциальные свойства массы в динамике.

Полагая, что амплитуда колебаний в потоке мала, молярную массу и его температуру можно считать постоянными и равными значениям на исследуемом статическом режиме. Таким образом, из-за свойства сжатия и расширения воздуха в потоке в окрестности установившегося режима существуют волны в пространстве и времени. Таким образом, можно полагать, что волновое уравнение есть распределение плотности воздуха относительно установившегося стационарного потока.

В соответствии с понятием инерциальной системы отсчета координат Ньютона, теорией термогазодинамического расчета ГТД и рассмотренными выше допущениями сконструируем математическую компьютерную модель волны и метод ее структурно-параметрической идентификации в ОК.

Полагаем, что в объеме проточной части  $V$  ОК постоянно находится масса воздуха  $m$ , на которую действует сила  $F$ :

$$F = ma,$$

или в соответствии с рисунком 1:

$$F = S(p(x_1, t) - p(x_2, t)),$$

или с учетом плотности воздуха

$$m = \rho(x)S(x)(x_2 - x_1),$$

где

$$a = v_t(x, t)$$

отсюда

$$\rho(x)v_t(x, t) = \lim_{x_2 \rightarrow x_1} \frac{p(x_1, t) - p(x_2, t)}{x_2 - x_1} = -p_x(x, t)$$

то есть

$$\rho(x)v_t(x, t) = -p_x(x, t)$$

С другой стороны, состояние определенной массы воздуха  $m$  в объеме  $V$  определяется уравнением состояния:

$$P = \frac{RT}{M} \frac{m}{V},$$

$$\frac{m}{V} = \rho,$$

$$k = \frac{RT}{M},$$

$$P = k\rho, \dots, p_x = k\rho_x$$

$$\rho v_t = -k\rho_x. \quad (1)$$

На основании проведенных выше аналитических преобразований определим полный дифференциал величины выделенной массы  $m$  как  $dm = \Delta m$ , то есть

$$\begin{aligned} \Delta m &= [S\rho(x_2, t)v(x_2, t)]\Delta t - [S\rho(x_1, t)v(x_1, t)]\Delta t, \\ \Delta m &= S(x_2 - x_1)(\rho(x, t_1) - \rho(x, t_2)). \end{aligned}$$

Примечание.

Полагаем, что некоторые параметры, определяющие колебания параметров массы, малы ( $v$ ,  $\rho_x$ ,  $\rho_t$ ,  $v_x$  – малы), а произведением двух малых величин пренебрегаем.

Проведем преобразования:

$$S(x_2 - x_1)(\rho(x, t_2) - \rho(x, t_1)) = -S\Delta t(\rho(x_2, t)v(x_2, t) - \rho(x_1, t)v(x_1, t))$$

и получим уравнение:

$$\rho_t = -\rho v_x. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) составляют систему (3а), которую далее дифференцируем и пренебрегаем произведением малых членов. После преобразований (3а) получаем уравнение (3).

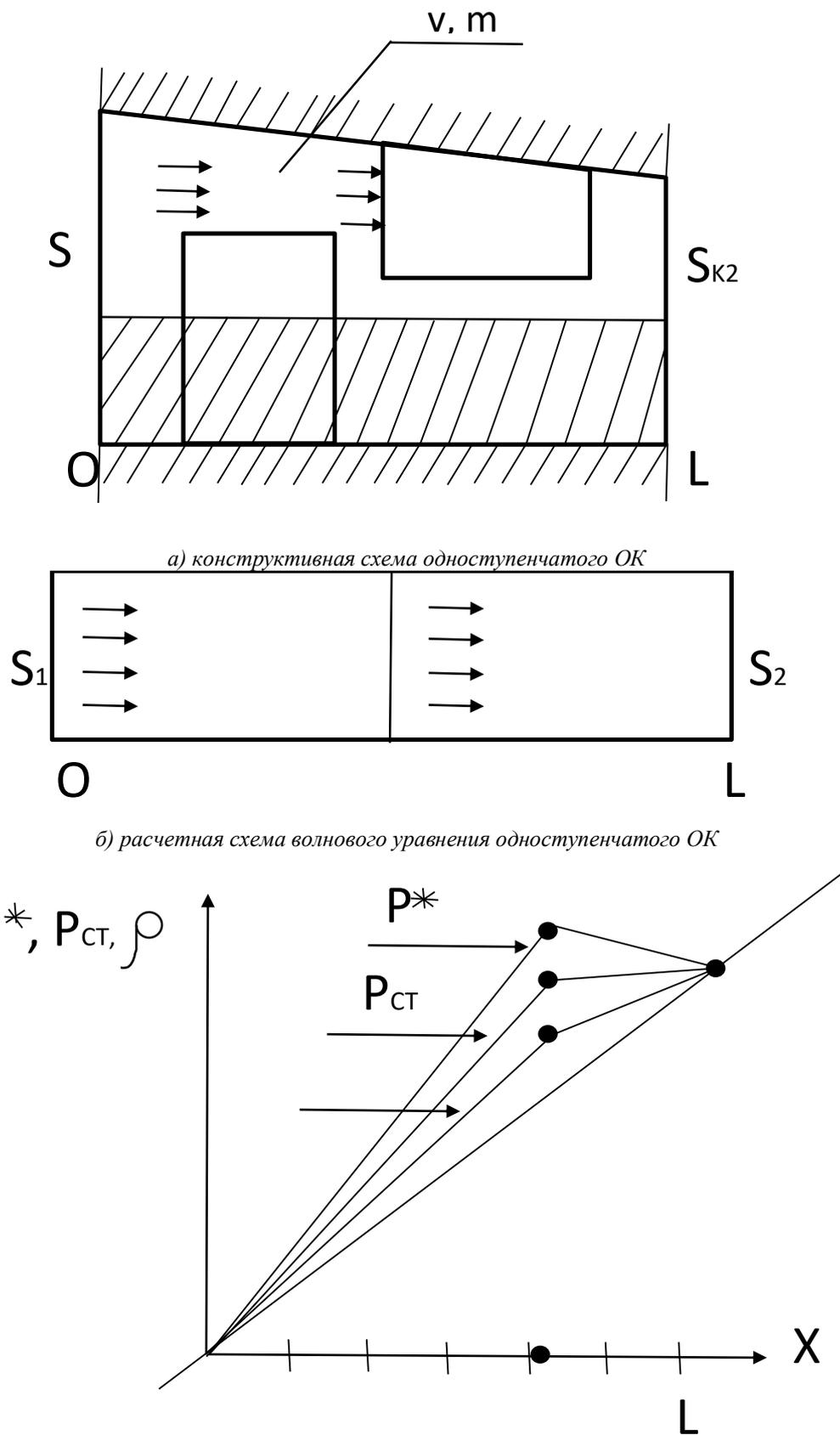


Рис. 1. Структура схема волновой 2D-модели одноступенчатого ОК в составе ГТД.

$$\begin{cases} \rho v_t = -k\rho_x, \left| \frac{\partial}{\partial x} \right. \\ \rho_t = -\rho v_t, \left| \frac{\partial}{\partial t} \right. \end{cases} \quad (3a)$$

$$\rho_{tt} = k\rho_{xx}. \quad (3)$$

Для решения уравнения (3) в ограниченном объеме проточной части ОК длиной  $L = (X2 - X1)$  применим метод разложения искомого решения в ряд Фурье при условии равномерной сходимости. Отметим, что уравнение (3) является линейным и обладает свойством суперпозиции, то есть сумма отдельных решений будет являться также его решением. Кроме того, если в точках  $X1, X2$  решение обращается в ноль, то и сумма решений в этих точках будет равна нулю.

При замене переменных волнового уравнения ОК (3) на общепринятые в уравнениях математической физики на  $u_{tt}=\rho_{tt}$ ,  $u_{xx}=\rho_{xx}$ ,  $a^2=k$  и задании граничных и начальных условий в соответствии с теорией проектирования ОК уравнение принимает следующий вид:

$$\begin{cases} u_{tt} = a^2 u_{xx}, \\ u(0, t) = 0, \\ u(L, t) = 0 \text{ (из условия стационарности)} \\ u(x, 0) = U_0 \sin\left(\frac{K\pi x}{L}\right), \end{cases}$$

$u_t(x, 0)=0$ , где  $k$  – количество ступеней ОК, а  $U_0$  – среднее значение динамической составляющей параметра, получаемой от передаваемой энергии в каждой ступени.

Решение уравнения (3) с добавленными начальными и граничными условиями известно в виде произведения двух отдельных функций, где каждая функция зависит только от одной переменной, то есть:

$$\begin{cases} u(x, t) = T_{(t)}X_{(x)}, \\ u_{tt}(x, t) = T''_{(t)}X_{(x)}, \\ u_{xx}(x, t) = T_{(t)}X''_{(x)}, \\ (T''_{(t)}X_{(x)} = a^2 T_{(t)}X''_{(x)})/a^2 T_{(t)}X_{(x)} \end{cases}$$

Получим задачу Штурма-Лиувилля:

$$\frac{T''_{(t)}}{a^2 T_{(t)}} = \frac{X''_{(x)}}{X_{(x)}} = -\lambda, \quad (4)$$

или

$$\begin{cases} X''_{(x)} + \lambda X_{(x)} = 0, \\ X_{(0)} = 0, \\ X_{(L)} = 0, \end{cases}$$

которая имеет три класса решений, одно из которых нетривиальное при  $\lambda > 0$ :

1)  $\lambda = 0$ ,

$$\begin{cases} X''_{(x)} = 0, \\ X_{(x)} = c_1 x + c_2, \\ c_1 = 0, c_2 = 0, \\ X_{(x)} = 0. \end{cases}$$

2)  $\lambda < 0$ , следовательно  $X_{(x)} \equiv 0$ .

3)  $\lambda > 0$ .

Решения будут иметь вид:

$$\begin{cases} X_{(x)} = A \sin(\sqrt{\lambda} x) + B \cos(\sqrt{\lambda} x), \\ X_{(0)} = B = 0, \\ X_{(x)} = A \sin(\sqrt{\lambda} x) = 0, \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \sin(\sqrt{\lambda} x) &= 0, \\ \sqrt{\lambda} L &= \pi n \text{ при } n \in \mathbb{Z}, \\ \sqrt{\lambda} &= \frac{\pi n}{L}, \\ \lambda &= \left(\frac{\pi n}{L}\right)^2, \\ X_{n(x)} &= A_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \text{ и } T'''(t) + a^2 \lambda T(t) = 0 \text{ или } T''(t) + \left(\frac{a \pi n}{L}\right)^2 T(t) = 0. \\ T(t) &= C_n \sin\left(\frac{a \pi n}{L} t\right) + D_n \cos\left(\frac{a \pi n}{L} t\right), \\ u_n(x, t) &= \left( C_n \sin\left(\frac{a \pi n}{L} t\right) + D_n \cos\left(\frac{a \pi n}{L} t\right) \right) A_n \sin\left(\frac{\pi n}{L} x\right) \end{aligned}$$

или общее решение (4) есть

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \sin\left(\frac{a \pi n}{L} t\right) + b_n \cos\left(\frac{a \pi n}{L} t\right) \right) \sin\left(\frac{\pi n}{L} x\right) \quad (5)$$

#### РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ ГТД КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКА

Математические модели ГТД как объекта управления, реализуемые в программных комплексах класса *DVIGwT*, *GasTurbo*, ГРЭТ, *TermoGTE*, *MATLAB*, *LabVIEW* и др., могут быть представлены в форме кибернетических моделей (ЦД) в пространстве состояний или неявно заданных функций [7, 8, 10, 13-15]:

$$X' = F(X, V, U), \text{ или } F(X, V, U) - X' = 0 \quad (6)$$

$$Y = \Phi(X, V, U), \text{ или } \Phi(X, V, U) - Y = 0 \quad (7)$$

где  $X=[n_1 \dots]T$  – вектор переменных состояния;

$V=[M, H, N_{ny}, Notb]T$  – вектор внешних воздействий;

$U=[GT, ана, Готб, Фрс, \dots]T$  – вектор управления;  $F, \Phi$  – нелинейные операторы (функции);  $Y$  – вектор выходных координат.

Соответственно, кибернетическую структуру модели (6)-(7) можно преобразовать в форму OLAP куба или в структуру реляционной базы данных (РБД), для этого достаточно вектора  $X, V, U, X', Y$  интерпретировать как нормативные шкалы, образующие ортогональную систему координат для элементов РБД, представляющих значения отношений между координатами шкал.

Дальнейшие рассуждения проведем на примере расчетно-аналитического моделирования виртуального одноооального ГТД на заданных статических режимах в системе *DWIGwT*. Результаты моделирования представим в форме фрагмента таблицы РБД в системе шкал (метаданных):  $V=[M, H]T$ ,  $X=[n]$ ,  $U=[GT, Готб]T$ ,  $Y=[n, GT, Готб, p(x1, t), m, \rho(x), vt(x, t)]T$ , для  $V=const$  (таблица 1), определяющих структуру кибернетической модели ОК как объекта управления, контроля и диагностики в составе ГТД с неявно заданными функциями между связанными параметрами. В этом случае в соответствии с теорией линеаризации можно вычислить параметры функциональных связей в явной линейной форме в окрестности заданного режима путем расчета полных дифференциалов и частных производных.

Таблица 1

## Форма представления результатов моделирования

Режим	Параметры							
Режим 0 $n_0$	$n_0$	$G_{T0}$	$G_{от60}$	$P_0(x, t)$	$m_0$	$\rho_0(x)$	$v_{t0}(x,t)$	....
Режим 1 $n_0+dn_1$	$n_1=$ $n_0+dn_1$	$G_{T1}$	$G_{от61}$	$P_1(x, t)$	$m_1$	$\rho_1(x)$	$v_{t1}(x,t)$	
Диф. (1,0)	$dn_1$	$dG_{T1}$	$dG_{от61}$	$dP_1(x,t)$	$dm_1$	$d\rho_1(x)$	$dv_{t1}(x,t)$	....
Режим 2 $n_0+dn_2$	$n_2= n_0 -$ $dn_2$	$G_{T2}$	$G_{от62}$	$P_2(x, t)$	$m_2$	$\rho_2(x)$	$v_{t2}(x,t)$	
Диф. (2,0)	$dn_2$	$dG_{T2}$	$dG_{от62}$	$dP_2(x,t)$	$dm_2$	$d\rho_2(x)$	$dv_{t2}(x,t)$	....
Режим 3 $n_0+dn_3$	$n_3= n_0 -$ $dn_3$	$G_{T3}$	$G_{от63}$	$P_3(x, t)$	$m_3$	$\rho_3(x)$	$v_{t3}(x,t)$	
Диф. (3,0)	$dn_3$	$dG_{T3}$	$dG_{от63}$	$dP_3(x,t)$	$dm_3$	$d\rho_3(x)$	$dv_{t3}(x,t)$	....
								....

Отметим, что таблица 1 является выделенной подтаблицей из РБД как дискретное подмножество параметров и их значений, характеризующих возможные состояния (статические и динамические) ОК из всего множества возможных режимов (состояний) ГТД.

Анализ приведенных параметров, их дифференциалов и частных производных показывает, что при заданной аналитической структуре волнового уравнения и его граничных и начальных условиях (1) – (5) по ним определяются частота и амплитуда колебаний плотности воздуха в потоке.

Таким образом, в явной форме предложен метод расчета параметров для коэффициентов линейных динамических моделей в частных производных в форме волновых уравнений газодинамического потока ГТД с помощью системы *DWIG*.

В неявной форме показана возможность создания интегральной вычислительной платформы, включающей системы типа *DVIGwT*, *MATLAB*, (функционалы *Identification*, *Optimization* и др. опции), *LabVIEW* и др. на основе соответствующих методов неявно выражаемых функций и ИТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны подход и расчетно-аналитический метод идентификации структуры и параметров множества взаимосвязанных локальных линейных моделей, эквивалентно отображающих значения параметров и их неявно выраженные функциональные связи в нелинейной термогазодинамической модели ГТД как объекта управления, контроля и диагностики.

2. Данный подход и метод продемонстрированы на примере идентификации структуры и параметров локальной линейной динамической модели ОК в форме волнового уравнения из нелинейной термогазодинамической модели ГТД.

3. Предложенный подход способствует формализации (соблюдению) условия “идентифицируемости и прослеживаемости” (установление причинно-следственных связей между состояниями разных узлов), способствуя решению задачи контроля и диагностики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Г. Г., Ризванов К. А., Иванов А. В., Шукалюк В. А. Проектирование семантических формальных моделей объектов исследуемой предметной области на основе категорий диалектики и теоретико-множественных методов. Вестник УГАТУ, том 27 № 3 (101) (2023), с. 82-98. [G. G. Kulikov, K. A. Rizvanov, V. A. Shukalyuk. Designing semantic formal models of objects of the subject area under study based on the categories of dialects and set-theoretic methods, (in Russian). Vestnik UGATU, Vol. 27, No. 3 (101) (2023), p. 82-98.]

2. Фролов И. Т. Введение в философию. М.: Республика, 2003. 623 с. [I. T. Frolov, Introduction to Philosophy, (in Russian). Moscow: Respublika, 2003. 623 p.]

3. **Аскин Я. Ф.** Философский детерминизм и научное познание. М.: Мысль, 1977. 188 с. [Ya. F. Askin, Philosophical Determinism and Scientific Knowledge (in Russian). Moscow: Mysl', 1977. 188 p.]
4. **Куликов Г. Г., Набатов А. Н., Речкалов А. В.** Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Системное моделирование предметной области. Уфа: УГАТУ, 2003. 103 с. [G. G. Kulikov, A. N. Nabatov, A. V. Rechkalov, Computer Aided Design of Management Information Systems. System Modeling of the Domain, (in Russian). Ufa: UGATU, 2003. 103 p.]
5. **Куликов Г. Г., Конев К. А., Суворова В. А.** Теория систем и системный анализ. Уфа: УГАТУ, 2012. 185 с. [G. G. Kulikov, K. A. Konev, V. A. Suvorova. Systems Theory and System Analysis, (in Russian). Ufa: UGATU, 2012. 185 p.]
6. **Логиновский О. В., Ризванов К. А., Куликов Г. Г.** Применение BI-принципов в гейтовой системе управления проектом создания цифрового двойника ГТД // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, №1. С. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102. [O. V. Loginovskiy, K. A. Rizvanov, G. G. Kulikov, Application of BI-principles in the gate project management system to create a digital twin of the GTE, (in Russian) // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics, Vol. 20, No. 1, pp. 16–26, 2020. DOI: 10.14529/ctcr200102.]
7. **Добрянский Г. В., Мартянова Т. С.** Динамика авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1989. - 240 с. [G. V. Dobryanskiy, T. S. Martyanova, Dynamics of Aircraft Gas-Turbine Engines, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1989. - 240 p.]
8. **Куликов Г. Г., Черкасов Б. А.** Математические модели, используемые в САПР двигателя и систем управления // Автоматика и регулирование реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1988. С. 323–343. [G. G. Kulikov, B. A. Cherkasov, Mathematical models in the systems of CAD of the engine and control systems, (in Russian), in: Automation and Control of Jet Engines. Moscow: Mashinostroenie, 1988. P. 323–343.]
9. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. М.: Машиностроение, 2008. Т. 5. 187 с. [A. A. Inozemtsev, M. A. Nikhamkin, V. L. Sandratskiy, Automation and Control of Aircraft Engines and Power Plants: textbook, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2008. Vol. 5. 187 p.]
10. **Фатиков В. С. и др.** Комплекс информационного и полунатурного моделирования для исследования систем автоматического управления и контроля многодвигательных силовых установок при их эксплуатации по состоянию // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 2. С. 155–160. [V. S. Fatikov et al. Information and semi-realistic simulation complex for the study of the automatic control and monitoring systems of multi-engine power plants during their operation, (in Russian) // Aerospace Engineering and Technology. 2005. No. 2. P. 155–160.]
11. **Распопов Е. В. и др.** Интеллектуальная система запуска для нового поколения авиационных ГТД // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 2(20). С. 153–157. [E. V. Raspopov et al. Intellectual start system for a new generation of aircraft GTEs, (in Russian). Vestnik UGATU. 2007. Vol. 9, No. 2(20). P. 153–157.]
12. **Арьюков В. Ю. и др.** Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. № 7(15). С. 167–173. [V. Yu. Ar'kov et al. Semi-realistic simulation of GTE failure for the testing of the monitoring and diagnostic systems of engines, (in Russian) // Aerospace Engineering and Technology. 2004. No. 7(15). P. 167–173.]
13. **G. Kulikov et al.** Dynamic Modeling of Gas Turbines / Springer-Verlag, New York, 2004, 309 p.
14. **Бутузов В. Ф., Крутицкая Н. Ч., Медведев Г. Н., Шишкин А. А.** Математический анализ в вопросах и задачах: учеб. пособие; под ред. В. Ф. Кутузова, 5-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 480 с. [V. F. Butuzov, N. Ch. Krutitskaya, G. N. Medvedev, A. A. Shishkin, Mathematical Analysis in Questions and Tasks: study guide, (in Russian); ed. by V. F. Kutuzov, 5th edition, revised. Moscow: FIZMATLIT, 2002. 480 p.]
15. **Горюнов И. М.** Термогазодинамические расчеты в программном комплексе DVIGwT: учебное пособие. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. [I. M. Goryunov, Thermogasdynamic Calculations in the DVIGwT software: study guide, (in Russian). Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2022.]
16. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005** Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. [GOST R ISO/IEC 15288-2005 Information technology. System engineering. System life cycle processes, (in Russian)]
17. **Способ полунатурных испытаний** систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей и стенд для его реализации / Г. Г. Куликов [и др.]. Пат. 2340883 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. No2007118610/06, заявл. 18.05.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. №34; Приор. 18.05.2007, №2007118610 (Российская Федерация). Введ. с 10.12.2008 по 18.05.2027. [G. G. Kulikov et al. Method for semi-realistic tests of the automatic control and monitoring systems of gas-turbine engines and a facility for its implementation, (in Russian). Russian Federation Patent No. 2340883, IPC G01M 15/14. No. 2007118610/06, application date 18.05.2007; publication date 10.12.2008, Bull. No. 34; priority date 18.05.2007, No. 2007118610 (Russian Federation). Valid from 10.12.2008 until 18.05.2027.]

#### ОБ АВТОРАХ

**КУЛИКОВ Геннадий Григорьевич**, д-р технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления УУНИТ.

**ГОРЮНОВ Иван Михайлович**, д-р технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей УУНИТ.

**ШУКАЛЮК Вадим Андреевич**, соискатель кафедры АСУ УУНИТ, инженер-конструктор АО «НПП «Аэросила».

**АФНАСЬЕВА Алена Витальевна**, соискатель кафедры АСУ УУНИТ, инженер-конструктор АО «НПП «Аэросила».

## METADATA

**Title:** Calculation and analytical method for identifying the structure and parameters of the system of wave equations of GTEs as an object of control, monitoring and diagnostics.

**Authors:** G. G. Kulikov<sup>1</sup>, I. M. Goryunov<sup>2</sup>, V. A. Shukalyuk<sup>3</sup>, A. V. Afanasyeva<sup>4</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup>Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

<sup>3,4</sup>JSC "NPP "Aerosila", Russia.

**Email:** <sup>1</sup> gennadyg\_98@yahoo.com

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 4 (102), pp. 77-85, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** A system-semantic approach to the formation of an automated method for identifying the structure and thermogasdynamic parameters of a system of wave models of basic units in a gas turbine engine is considered, based on its 4d – 1d computer models. It is shown that this approach makes it possible to provide the required level of expansion and formalization of knowledge in the form of a variety of system models of digital twins (DT) of real and virtual objects and their processes while preserving their cause-and-effect relationships. The logic of representing elements of system models of gas turbine engine units in the spatial-temporal Minkowski basis based on their wave functions is expanded. The objective need for the formation and application of a subject-oriented formal (generative) metalanguage is shown. An example of the application of this approach to identifying the structure and parameters of the wave model of an axial compressor as part of a gas turbine engine as an object of control and diagnostics is considered.

**Key words:** system approach, system model of gas turbine engine, wave equations, digital twin, metalanguage

**About authors:**

**KULIKOV Gennady Grigorievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automated Control Systems, UUST, Ufa, Russia.

**GORYUNOV Ivan Mikhailovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Aviation Engines, UUST, Ufa, Russia.

**SHUKALYUK Vadim Andreevich**, postgraduate degree seeker at the Department of Automated Control Systems of UUST, design engineer at JSC "NPP "Aerosila", Ufa, Russia.

**AFANASYEVA Alena Vitalievna**, postgraduate degree seeker at the Department of Automated Control Systems of UUST, design engineer at JSC "NPP "Aerosila", Ufa, Russia.