

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

<sup>1</sup>Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., <sup>2,3</sup>А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.,<sup>1</sup>А. А. Колодяжный, соискатель, <sup>1</sup>Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц.<sup>1</sup>Академия гражданской защиты, г. Донецк, ДНР,<sup>2</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР<sup>3</sup>Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, РоссияТел.: +38 (071) 3821135; E-mail: [mitia3@donapex.net](mailto:mitia3@donapex.net)

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ И СВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В статье рассмотрены особенности формирования функционально-ориентированных свойств структуры газотурбинного двигателя, а также создания связей параметров технологических процессов обеспечения этих свойств. При этом установлены принципы обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, характеризуемых неравномерностями R-родов. В работе показано, что для обеспечения функционально-ориентированных свойств множества структурных элементов газотурбинного двигателя необходимо связное множество параметров технологических процессов их обеспечения. Это множество параметров технологических процессов образует связный технологический континуум параметров обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, структура, функционально-ориентированные свойства, связный технологический континуум параметров, технологический процесс.

D. A. Mikhaylov, A. N. Mikhaylov, A. A. Kolodyazhniy, E. A. Sheyko

## SOME FEATURES OF FORMATION OF FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES OF THE STRUCTURE OF A GAS TURBINE ENGINE AND THE CONNECTIONS OF THE PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSES

The article considers the features of the formation of functionally oriented properties of the structure of a gas turbine engine, as well as the creation of links between the parameters of technological processes to ensure these properties. At the same time, the principles of providing functionally oriented properties to the structure of a gas turbine engine under the conditions of the operation of uneven operational functions, characterized by irregularities of R-types, are established. The paper shows that to ensure the functionally oriented properties of a set of structural elements of a gas turbine engine, a coherent set of parameters of technological processes for their provision is necessary. This set of parameters of technological processes forms a coherent technological continuum of parameters for providing functionally oriented properties to the structure of a gas turbine engine.

**Keywords:** a gas turbine engine, the structure, functionally oriented properties, connected continuum process parameters, technological process.

### Введение

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) (рис. 1) широко используются в авиации как высокоэффективные источники движения [1, 2, 3]. Они особенно широко применяются для современных самолетов [2, 3] и вертолетов [1, 3]. Вместе с тем, ГТД представляют собой сложную систему, имеющую множество различных деталей, групп деталей, узлов и подсистем, которые обуславливают эксплуатационные особенности и возможности этих авиационных двигателей.

Совершенствование и перспективное развитие ГТД происходит в различных

направлениях [1, 2]. Здесь, можно отметить следующие основные направления: улучшение термодинамических параметров, схемных и структурно-компоновочных решений; повышение показателей эффективности использования силовой установки; совершенствование связей силовой установки с бортом летательного аппарата; повышение эксплуатационных и технических свойств структуры авиационного двигателя; решение вопросов дизайна, эстетики, эргономики, экологии и конъюнктуры рынка продаж ГТД. Эти и другие направления перспективны и активно развиваются.



Рисунок 1. Общий вид ГТД модели ТВ3-117.

В данной работе рассматриваются вопросы повышения эксплуатационных свойств ГТД за счет обеспечения структуре ГТД функционально-ориентированных свойств (ФОС) [4]. Необходимость применения ФОС структуре ГТД обусловлена тем, что его структура состоит из множества деталей (элементов), структура иерархична (рис. 2) и на элементы структуры ГТД действуют неравномерные эксплуатационные воздействия, а именно, абразивно-эрозионные, температурные, химические, физические и другие воздействия. Эти неравномерные воздействия приводят к неравномерным и неодинаковым износам и разрушениям элементов структуры ГТД, что снижает технико-экономические параметры эксплуатации.

Для повышения эксплуатационных свойств [5] и технико-экономических показателей ГТД целесообразно применение ФОС [4] элементов структуры ГТД, которые позволяют компенсировать действие неравномерных износов и разрушений в процессе эксплуатации авиационного двигателя [6]. При этом для обеспечения ФОС иерархической структуры ГТД необходимы специальные технологии, которые бы позволяли ре-

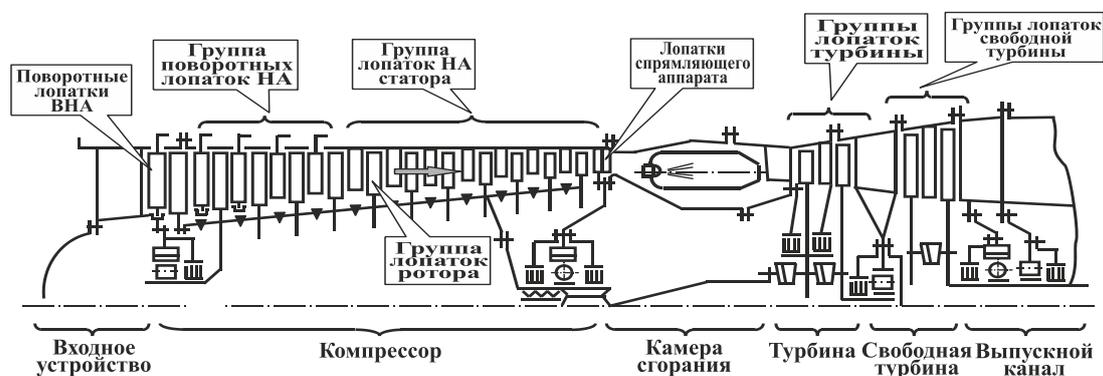


Рисунок 2. Схема вертолетного ГТД модели ТВ3-117 с указанием групп лопаток турбокомпрессора.

шать вопросы обеспечения ФОС отдельным деталям, множеству деталей, группам деталей и подсистемам ГТД на базе определенных связей и закономерностей. Эти вопросы рассматриваются в этой работе.

Целью данной работы является разработка методов формирования ФОС структуры ГТД на основе определения связей параметров технологических процессов и эксплуатационных свойств.

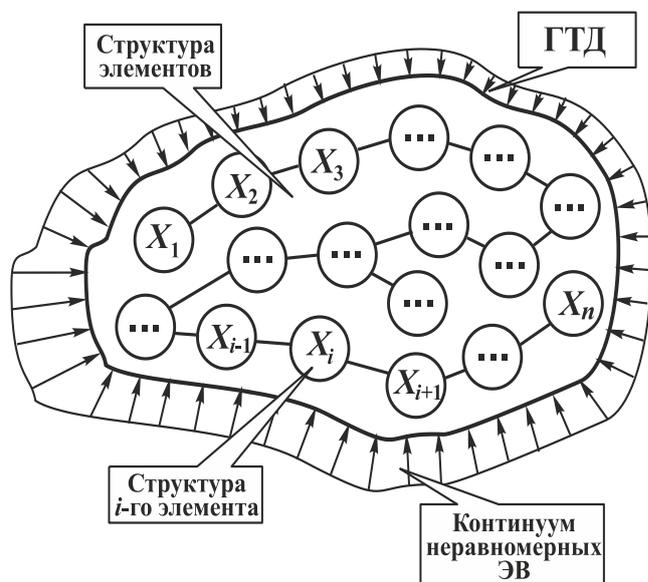
В соответствии с поставленной целью в данной работе определены следующие задачи: выполнить анализ структуры и основных особенностей эксплуатации ГТД;

предложить общий подход обеспечения ФОС структуры ГТД в зависимости от эксплуатационных его свойств; установить особенности реализации ФОС на основе обеспечения связей технологических параметров для структурных элементов ГТД.

Эти задачи решаются в данной работе.

### 1. Структура и основные особенности эксплуатации ГТД.

Можно отметить, что ГТД представляет собой сложную систему, которая имеет заданную структуру (рис. 3). Структуру ГТД можно представить следующим выражением:



нием:

$$Str = Str\{X, A\},$$

$Str$  - структура элементов ГТД;

$X$  - множество структурных элементов ГТД;

$A$  - множество связей (отношений) на множестве структурных элементов  $X$ .

Здесь:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\};$$

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_m\},$$

где  $X_i$  -  $i$ -й структурный элемент множества  $X$ ;

$A_i - j$ -е отношение (связь) между структурными элементами  $X$  на множестве  $A$ ;

$n$  - мощность множества  $X$ ;

Рисунок 3. Гипотетическая схема структуры ГТД и действия неравномерных эксплуатационных функций.

$m$  - мощность множества  $A$ .

На рис. 3 представлена гипотетическая схема структуры ГТД и действия неравномерных эксплуатационных функций. Здесь показаны структурные элементы ГТД, связи и континуум неравномерных эксплуатационных функций (ЭФ).

Учитывая особенности структурирования элементов ГТД, представленную в работах [6, 7], иерархическую структуру ГТД можно представить следующим образом:

- структура 1-го уровня;
- структура 2-го уровня;
- структура 3-го уровня;
- структура 4-го уровня;
- структура 5-го уровня;
- структура 6-го уровня;
- структура 7-го уровня.

При эксплуатации ГТД на его иерархическую структуру действуют неравномерные эксплуатационные воздействия (ЭВ) 7-ми родов, которые приводят к неравномерному износу и разрушению этой структуры. На основании этого структуру износа элементов ГТД можно представить следующим выражением:

$$Str_1 = Str\{F, \gamma\},$$

где  $Str_1$  - структура износа ГТД;

$F$  – множество ЭВ (особенностей износа) структурных элементов ГТД;

$\gamma$  – множество отношений (связей) на множестве  $F$ .

Здесь: 
$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n\};$$

$$\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_m\},$$

где  $F_i$  –  $i$ -й структурный элемент множества  $F$ ;

$\gamma_j$  –  $j$ -е отношение (связь) между структурными элементами множества  $F$ ;

$m$  – мощность множества  $\gamma$ .

Таблица 1. Особенности структуры и действия неравномерных эксплуатационных функций по элементам ГТД

Неравномерность абразивно-эрозионного износа структуры	Гипотетическая схема действия эксплуатационных функций	Элементы структуры ГТД
Неравномерность 1-го рода		Система ГТД
Неравномерность 2-го рода		Подсистемы
Неравномерность 3-го рода		Группы
Неравномерность 4-го рода		Детали
Неравномерность 5-го рода		<u>Элементы:</u> точка, линия, поверхность, объем
Неравномерность 6-го рода		Зоны
Неравномерность 7-го рода		Макро-, микро-, нанозоны

Следует отметить, что при эксплуатации ГТД на его структуру действуют неравномерные ЭВ, которые вызывают неравномерные износы элементов. Поэтому в соответствии со структурой ГТД иерархическая структура износа его элементов будет иметь следующие составляющие [6]:

- неравномерный износ 1-го рода;
- неравномерный износ 2-го рода;
- неравномерный износ 3-го рода;
- неравномерный износ 4-го рода;
- неравномерный износ 5-го рода;
- неравномерный износ 6-го рода;
- неравномерный износ 7-го рода.

В табл. 1 представлены особенности структуры и действия неравномерных эксплуатационных функций по элементам ГТД. Здесь показаны рода неравномерностей дей-

ствия абразивно-эрозионного износа структуры, гипотетические схемы действия эксплуатационных функций и элементы структуры ГТД,

Возникающий неравномерный износ иерархической структуры ГТД приводит к снижению технико-экономических показателей ГТД, неполному использованию потенциальных возможностей его деталей и уменьшению возможностей дальнейшего повышения ресурса и его эксплуатационных свойств. Для решения этих вопросов необхо-

димо на всех иерархических уровнях их износа обеспечивать структуре (структурных элементов) ГТД ФОС [7].

На рис. 4 показан граф системы ГТД действия неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) и формирования ФОС по уровням его структуры (КЭВ – конти

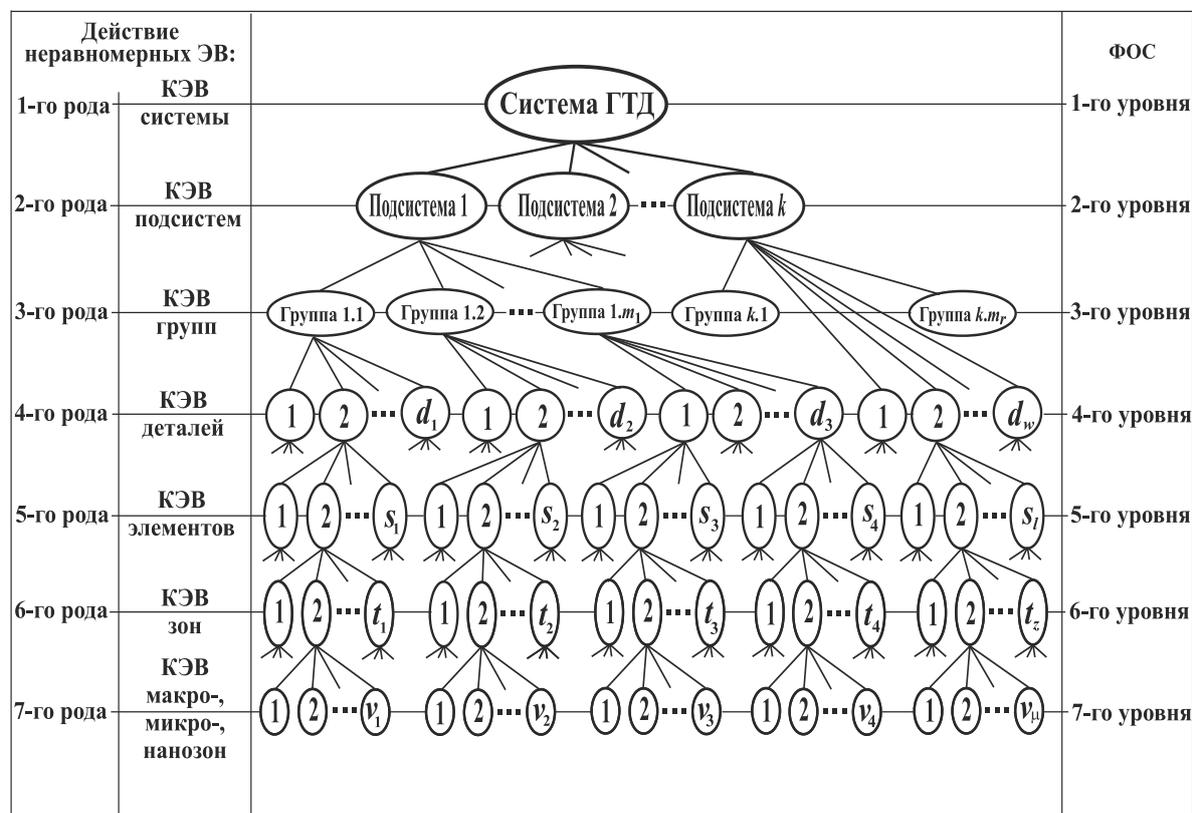
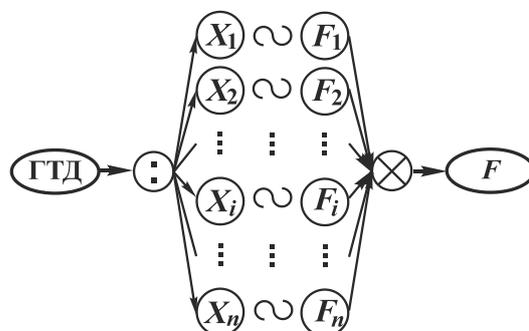


Рисунок 4. Граф системы ГТД действия неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) и формирования ФОС по уровням его структуры (КЭВ – континуум эксплуатационных воздействий).

нуум эксплуатационных воздействий). Можно отметить, что на каждом уровне иерархической структуры элементов ГТД действует континуум эксплуатационных воздействий (КЭВ) соответствующий данному роду неравномерных ЭВ. При этом на каждое множество элементов структуры действует заданное ЭВ. В этом случае, эти особенности можно представить следующим выражением:



где  $\odot$  - знак декомпозиции структурных элементов ГТД;

↔ - знак бинарного соответствия структурных элементов ГТД и действия эксплуатационных функций;

⊗ - знак композиции элементарных функций эксплуатационного континуума.

## 2. Особенности обеспечения ФОС структуры ГТД

ФОС структуры ГТД позволяют решать вопросы:

- обеспечения качественно новой совокупности свойств ГТД;
- обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств

ГТД;

- установления закономерностей эксплуатационных свойств ГТД в зависимости от производственно-технических свойств структуры ГТД;

- управления эксплуатационными свойствами ГТД в процессе изготовления;

- повышения технико-экономических показателей ГТД.

Под качеством изделий машиностроения понимается совокупность свойств, обуславливающих их пригодность выполнять свое функциональное назначение в заданном диапазоне изменения условий эксплуатации. Для оценки качества машин применяют единичные и комплексные показатели [5].

Наибольшее применение в машиностроении получили единичные показатели, которые подразделяют на эксплуатационные и производственно-технические [5].

К группе эксплуатационных показателей свойств относят показатели назначения, надежности, эргономики и эстетики [5]. К группе производственно-технических показателей можно отнести физико-механические свойства, технологичность, технологическую наследственность, точность, показатели шероховатости поверхности и другие показатели.

Следует отметить, что надежность является комплексным свойством, которая в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. При этом показателями долговечности является ресурс, гамма-процентный ресурс, средний срок службы, срок службы до списания и другие параметры [5]. Для ГТД, наряду со всеми представленными выше параметрами качества изделий, важнейшим эксплуатационным параметром является ресурс авиационного двигателя.

В целом, эксплуатационные свойства ГТД можно представить следующим вектором:

$$C^{\vartheta} = \left\{ \begin{array}{c} C_1^{\vartheta} \\ C_2^{\vartheta} \\ C_3^{\vartheta} \\ \dots \\ C_K^{\vartheta} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $C^{\vartheta}$  - вектор эксплуатационных свойств;

$C_k^{\vartheta}$  -  $k$ -й элемент вектора  $C^{\vartheta}$ .

$K$  – общее количество свойств.

Можно отметить, что в случае обеспечения ФОС структуре ГТД в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, эксплуатационные свойства (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, ресурс и тому подобное)

элементов этой структуры должны быть равными или одинаковыми, они могут быть кратными в случае замены отказавших элементов запасными, или функционально-зависимыми. При обеспечении свойств ГТД одной из важнейших характеристик авиационного двигателя является его ресурс  $C_k^o = R_k$ . В этом случае, ресурс элементов структуры ГТД можно представлять следующими выражениями [6, 7]:

- при обеспечении равного ресурса элементов структуры

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_i = \dots = R_n = R ; \tag{2}$$

- при обеспечении кратного ресурса элементов структуры

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 = k_3 R_3 = \dots = k_i R_i = \dots = k_n R_n = R ; \tag{3}$$

- при обеспечении функционально-зависимого ресурса элементов структуры

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= f_1(R) ; \\ R_2 &= f_2(R) ; \\ R_3 &= f_3(R) ; \\ &\dots\dots\dots \\ R_i &= f_i(R) ; \\ &\dots\dots\dots \\ R_n &= f_n(R) , \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

где  $R$  – общий ресурс ГТД;

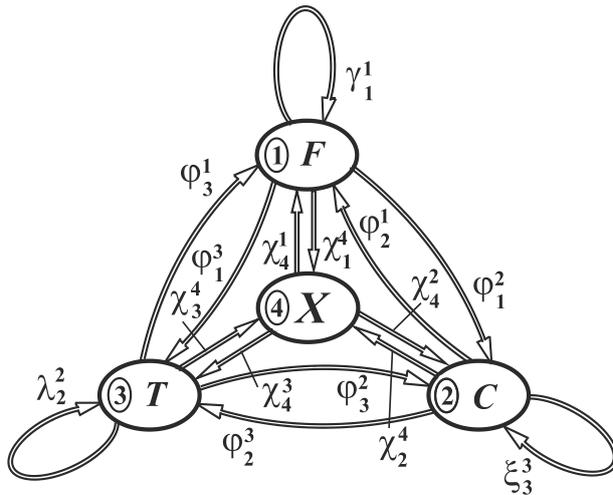


Рисунок 5. Схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД.

$R_i$  – ресурс  $i$ -го структурного элемента ГТД;

$k_i$  – коэффициент кратности (определяет количество замен структурного элемента ГТД);

$f_i(R)$  – функциональная зависимость ресурса  $i$ -го структурного элемента ГТД.

Для ГТД можно выделить следующие свойства (рис. 5):

- эксплуатационные свойства  $F$ ;
- технические (физико-механические) свойства  $C$ , в том числе ФОС;
- производственные (технологические) свойства  $T$ .

В этом случае, можно записать следующее выражение:

$$F \simeq C \simeq T ,$$

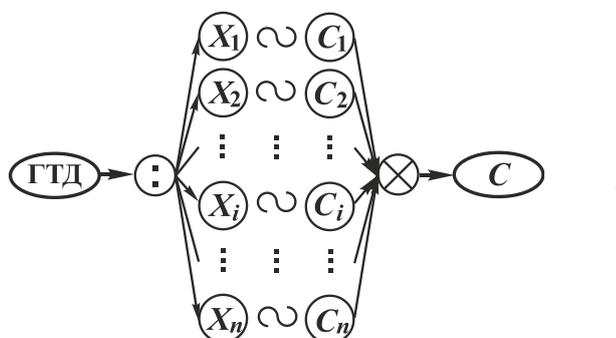
где  $\simeq$  - знак бинарного соответствия свойств.

В этом случае можно отметить, что в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций на элементы иерархической структуры ГТД необходимо обеспечивать равные, кратные или функционально-ориентированные эксплуатационные параметры для всех элементов ГТД, а именно: надежность, долговечность, ресурс или

другие параметры. В этих условиях это достигается только посредством применения ФОС структурных элементов ГТД. При этом эксплуатационные свойства, ФОС и технологические параметры связаны между собой связями (рис. 5) на базе определенных закономерностей, например, по износу материала, параметрам обеспечения физико-механических свойств и равному ресурсу эксплуатации элемента ГТД.

На рис. 5 представлена схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД. Здесь, показаны следующие составляющие: 1 – эксплуатационные функции (свойства)  $F$ ; 2 - технические (физико-механические) свойства  $C$ , в том числе ФОС; 3 - производственные (технологические) свойства  $T$ ; 4 – структурные элементы системы ГТД. Буквами  $\varphi_i^j, \chi_i^j, \gamma_i^j, \xi_i^j, \lambda_i^j$  - обозначены прямые и  $\varphi_j^i, \chi_j^i, \gamma_j^i, \xi_j^i, \lambda_j^i$  - обратные связи между соответствующими составляющими схемы рис. 5.

Заметим, что в соответствии с рис. 5 между структурой  $X$  ГТД и его техническими свойствами  $C$  (ФОС) действуют связи, которые можно представить с помощью бинарного соответствия параметров:



где  $X_i$  –  $i$ -й элемент структуры ГТД;  
 $C_i$  -  $i$ -е свойство элемента структуры.

Можно отметить, что обеспечение ФОС структуры необходимо выполнять по всем иерархическим уровням структуры ГТД. В этом случае ФОС структуры будет следующих уровней:

- ФОС 1-го уровня;
- ФОС 2-го уровня;
- ФОС 3-го уровня;
- ФОС 4-го уровня;
- ФОС 5-го уровня;
- ФОС 6-го уровня;
- ФОС 7-го уровня.

В этом случае, ФОС каждого уровня структуры связаны между собой, то есть их параметры зависимы (рис. 6). А именно, ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) каждого структурного элемента  $C_i$  определяются в зависимости от действия эксплуатационных функций, при этом ФОС соседних элементов структуры связаны между собой через особенности действия неравномерностей их износа. При этом ФОС обеспечиваются из условия того, что эксплуатационные свойства всех элементов  $F$  равны, кратны или функционально зависимы, параметры которых определяются в соответствии с выражениями (1), (2), (3) и (4) [7].

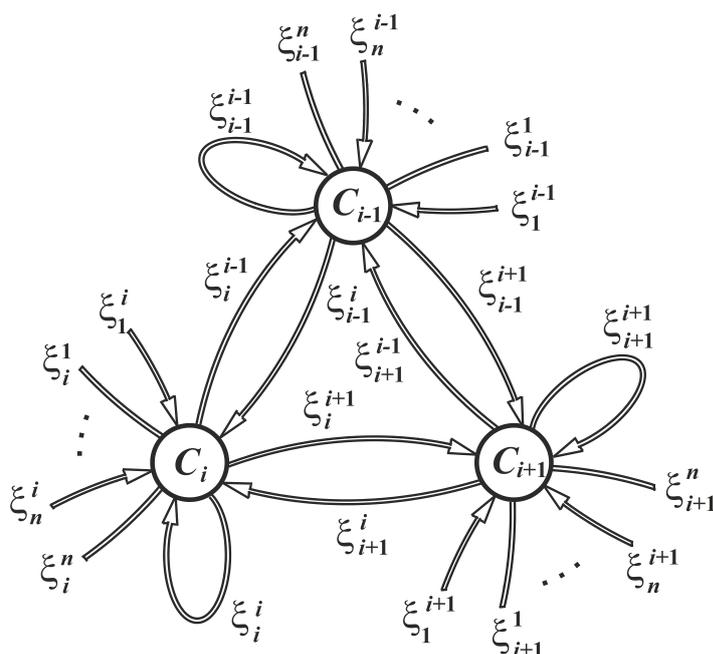


Рисунок 6. Континуум ФОС структурных элементов ГТД и схема связей его соседних элементов.

$\xi$  – множество связей (отношений) на множестве  $C$ .

Здесь:

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n\};$$

$$\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j, \dots, \xi_m\},$$

где  $C_i$  –  $i$ -й структурный элемент множества  $C$ ;

$\xi_j$  –  $j$ -е отношение (связь) между структурными элементами множества  $C$ ;

$m$  – мощность множества  $\xi$ .

Следует отметить, что реализация ФОС структурных элементов ГТД должна выполняться на базе группы особых принципов ориентации эксплуатационных функций  $F$ , свойств (ФОС)  $C$  и технологических параметров  $T$  [4]:

1. Принцип функциональной ориентации.
2. Принцип топологической ориентации.
3. Принцип количественной ориентации.
4. Принцип структурной ориентации и других принципов.

В качестве примера на рис. 7 представлена схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций  $F$ , свойств  $C$  (ФОС) и технологических воздействий  $T$  [4]. Между составляющими схемы (рис. 7) действуют связи  $\lambda_i^j$ , которые определяют закономерности отношений, с помощью которых выполняется ориентация физико-механических свойств элементов в зависимости от особенностей их эксплуатации на базе обеспечения заданных технологических воздействий.

Можно отметить, что кроме приведенных принципов формирования изменяющихся свойств в условиях действия неодинаковых и не равномерных эксплуатационных функций (износ, разрушения), процесс обеспечения ФОС следует выполнять на базе следующих дополнительных принципов:

На рис. 6 показана схема континуума ФОС структурных элементов ГТД и схема связей их соседних элементов. Здесь показано:  $C_i, C_{i-1}, C_{i+1}$  – ФОС соседних элементов ГТД;  $\xi_i^j$  – связь между  $i$ -м и  $j$ -м элементами;  $\xi_j^i$  – связь между  $j$ -м и  $i$ -м элементами;  $n$  – мощность множества  $C$  на каждом уровне обеспечения ФОС структуре ГТД.

В целом, ФОС структуры ГТД можно представить следующим образом:

$$Str_2 = Str\{C, \xi\},$$

где  $Str_2$  – структура ФОС ГТД;

$C$  – множество ФОС структурных элементов ГТД;

1. Обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс и другие единичные эксплуатационные свойства) по всем элементам каждого уровня структуры ГТД.

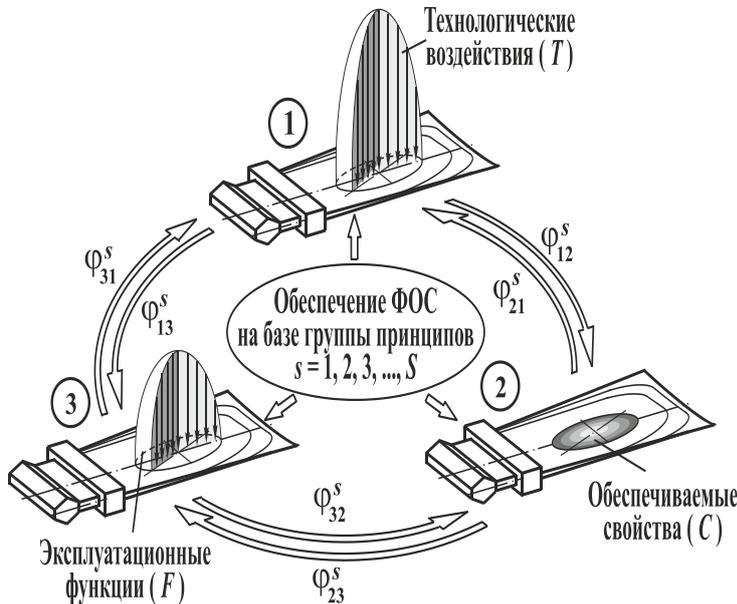


Рисунок 7. Схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций  $F$ , свойств  $C$  (ФОС) и технологических воздействий  $T$ .

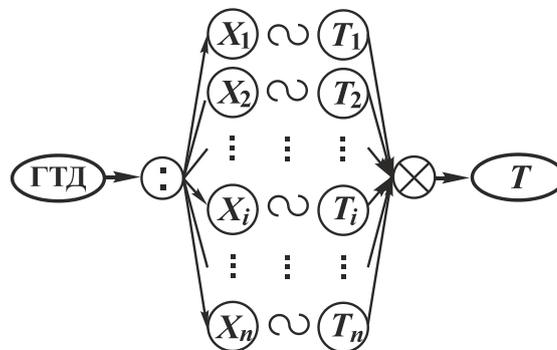
2. Обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс и другие единичные эксплуатационные свойства) по всем уровням иерархической структуры ГТД.

3. Последовательного распределения изменяющихся ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) по всем элементам каждого уровня структуры ГТД, с началом от элемента, на котором действует максимальная интенсивность его износа или разрушения, затем по другим элементам в зависимости от степени уменьшения действия параметров эксплуатационных

воздействий.

4. Последовательного распределения изменяющихся ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) по всем уровням структуры ГТД, с началом от уровня, на котором действует максимальная интенсивность износа или разрушения элементов, затем по другим уровням в зависимости от степени уменьшения действия параметров эксплуатационных воздействий.

Обеспечение ФОС структуре ГТД выполняется посредством технологии, которая должна реализовываться на базе отношений бинарного соответствия между элементами структуры  $X$  и необходимыми параметрами технологических воздействий (рис. 5):



Таким образом, на основании приведенных особенностей, принципов ориентации свойств и дополнительных принципов - формируются ФОС по структурным эле-



- технологии для обеспечения ФОС 1-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 2-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 3-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 4-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 5-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 6-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 7-го уровня.

В работах [8, 9, 10, 11] разработан общий подход синтеза комплексного много-связного технологического процесса обеспечения ФОС элементам ГТД. В данной работе приводятся данные об особенностях обеспечения ФОС всей структуре ГТД. Здесь, можно отметить, что комплексный многосвязный технологический процесс обеспечения ФОС структуре ГТД должен строится на базе следующего условия.

Технологические особенности обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств (надёжность, долговечность, ресурс, стойкость и тому подобные критерии) множества структурных элементов ГТД с ФОС (изменяющиеся во времени и/или в пространстве геометрические и/или физико-механические свойства), работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий  $R$ -родов, заключаются в том, что формирование равных, кратных или функционально-зависимых параметров ФОС на подмножествах элементов  $1, 2, 3, \dots, i_r, \dots, n_r$  каждого уровня  $r$  на множестве уровней  $1, 2, 3, \dots, r, \dots, R$  структуры, выполняется в зависимости от их эксплуатационных свойств, а именно, последовательно обеспечиваются по структурным элементам каждого уровня, начиная, сначала с элемента и уровня, на которых происходит максимальный износ и/или разрушение при эксплуатационных воздействиях, затем, по другим элементам данного уровня, в зависимости от изменения параметров эксплуатационных воздействий и физико-механических свойств первого элемента, далее, аналогично выполняется обеспечение свойств элементов по другим уровням. В этом случае ФОС формируются на базе следующих выражений:

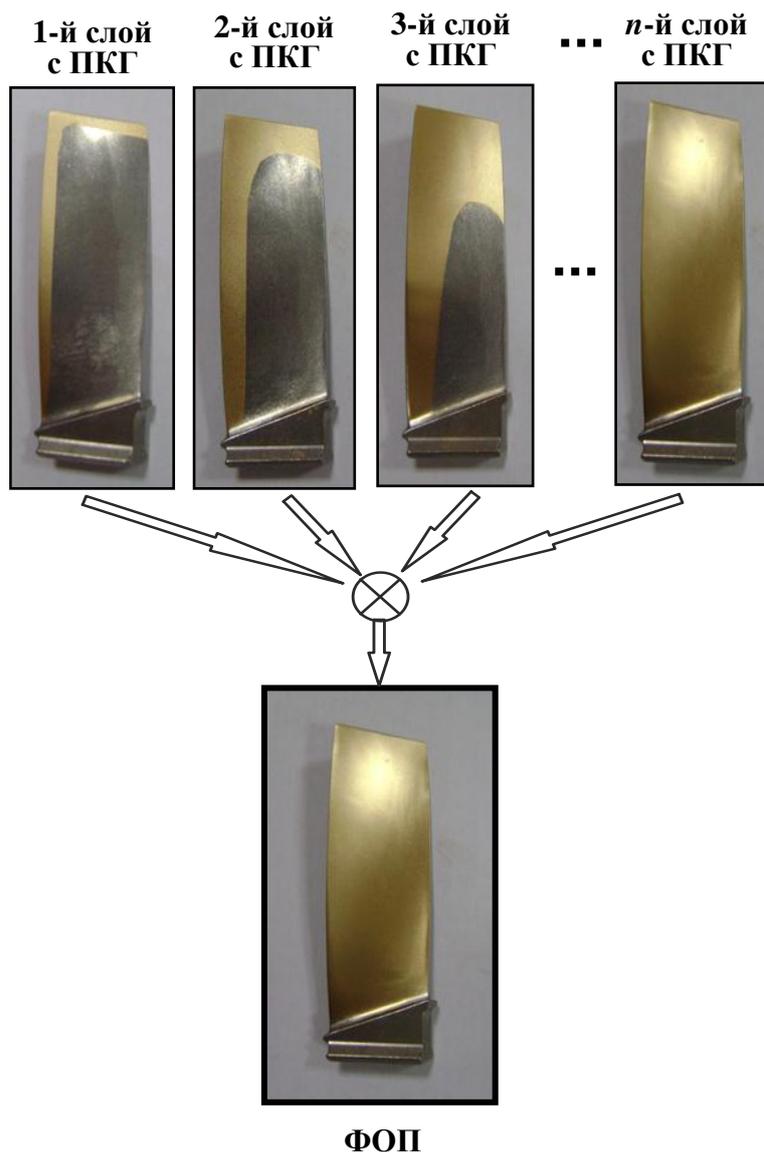
$$\left. \begin{aligned} C_1^r &= f_1(F_1^r = F_{\max}); \\ C_2^r &= f_2(C_1^r, F_2^r); \\ C_3^r &= f_3(C_1^r, F_3^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_i^r &= f_i(C_1^r, F_i^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_n^r &= f_n(C_1^r, F_n^r), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $C_1^r, C_2^r, C_3^r, \dots, C_i^r, \dots, C_n^r$  - множество физико-механических свойств соответствующего элемента структуры ГТД на уровне  $r$ ;

$F_1^r, F_2^r, F_3^r, \dots, F_i^r, \dots, F_n^r$  - множество эксплуатационных функций действующих на соответствующий элемент структуры ГТД на уровне  $r$ ;

$C_i^r = f_i(C_1^r, F_i^r)$  - функциональная зависимость физико-механических свойств  $i$ -го элемента  $r$ -го уровня структуры ГТД от свойств и эксплуатационных воздействий на первый элемент структуры.

На базе первой зависимости выражения (5) и ФОС ГТД можно формировать заданные, требуемые или предельные его свойства, а также управлять его параметрами в процессе реализации комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС. В этом случае, при распределении ФОС по элементам, первым элементом будет тот, на который действует максимальные эксплуатационные воздействия  $F_{max}$ . При этом свойства всех элементов структуры находятся в функциональной зависимости от первого элемента и особенностей действия эксплуатационных воздействий. Следует иметь в виду, что физико-механические свойства первого элемента могут быть заданными, требуемыми или предельными, далее идет распределение свойств по элемен-



там каждого уровня и по уровням иерархической структуры ГТД. Это позволяет управлять физико-механическими свойствами структуры ГТД на этапе реализации технологии обеспечения ФОС. Определив свойства первого элемента на основании выражения (5) формируются все ФОС структуры ГТД.

Таким образом, приведенные особенности формирования свойств (5) структуре ГТД позволяют обеспечивать необходимые ФОС элементов, а приведенные связи (рис. 8) определяют технологические параметры этих свойств в зависимости от особенностей эксплуатации элементов структуры.

В качестве примера обеспечения ФОС на рис. 9 приведена схема композиции многослойного функционально-ориентированного покрытия (ФОП) лопатки компрессора, состоящего из  $n$  слоев с пространственным контуром границ (ПКГ) каждого [12].

Рисунок 9. Схема композиции многослойного ФОП лопатки компрессора, состоящего из  $n$  слоев с ПКГ каждого.

Можно отметить, что ФОП с ПКГ позволяет формировать многослойное покрытие лопатки изменяющейся толщины из слоев равной толщины. В этом случае, толщина покрытия больше в зо-

нах интенсивного износа, а именно на входной и периферийной кромках, толщина покрытия меньше в зонах, где действует меньший абразивно-эрозионный износ. При этом общая толщина ФОП определяется интенсивностью износа опытного покрытия [12]. В данном случае, многослойное ФОП формируется на основе слоев нитрид титанового покрытия, образуемого на базе вакуумных дуговых покрытий.

На рис. 12 представлена схема композиции многослойного ФОП состоящего из  $n$  слоев для 5-го уровня обеспечения ФОС. Каждый слой ФОП имеет ПКГ, геометрические параметры которого определяются на базе абразивно-эрозионного износа опытного однослойного покрытия в ГТД [12] при эксплуатации.

Основные особенности разработанного многослойного ФОП [12] является то, что данное покрытие защищает (консервирует) основной материал лопатки на период гарантированного ресурса ГТД. При этом в конце этого ресурса происходит полный износ покрытия (единовременно) без износа основного материала, что позволяет повторно наносить ФОП и повышать ресурс лопаток в целом. Далее, на основании связей рис. 8, выражения (2) и (5) выполняется согласование параметров свойств по группам лопаток, между группами лопаток и так далее.

ФОП лопаток ГТД (рис. 9) обеспечивает следующее:

- повышается ресурс лопаток;
- повышается ремонтпригодность лопаток;
- обеспечивается заданный, требуемый или предельный ресурс лопаток;
- повышается эксплуатационный потенциал лопаток;
- повышаются технико-экономические показатели эксплуатации лопаток ГТД.

Таким образом, представленные особенности и принципы реализации комплексного многосвязного технологического процесса для множества элементов структуры ГТД позволяют формировать ФОС по элементам каждого уровня и по уровням иерархической структуры на базе множества связанных технологических процессов.

### **Заключение**

В представленной работе выполнена разработка технологического подхода формирования ФОС структуры ГТД на основе определения связей параметров технологических процессов и эксплуатационных свойств. Этот подход базируется на множестве связанных технологических процессов, последовательно обеспечивающих формирование ФОС иерархической структуры ГТД, работающего в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций. При этом связи параметров технологических процессов позволяют обеспечивать равные, кратные или функционально-зависимые эксплуатационные свойства (надежность, долговечность, ресурс, ремонтпригодность и другие параметры) в зависимости от параметров технических свойств элементов (физико-механические свойства), а именно ФОС структуры ГТД. Решение этих вопросов базируется на следующем:

- на определении особенностей эксплуатации структуры ГТД;
- на формировании ФОС структуры ГТД из условия обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств всех элементов;
- на обеспечении связей параметров структуры комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС иерархической структуры ГТД.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.

2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Богуслаев, В. А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и [др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2005. – 559 с.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Суслов, А. Г. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 400 с.
6. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – № 4 (50). – С. 126-131.
7. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – № 4 (50). – С. 132-139.
8. Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1(103). – С. 40-48. – <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>.
9. Михайлов, Д. А. Общий подход синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXVII международной научно-техн. конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 235-253.
10. Михайлов, А. Н. Методика направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов обработки лопаток ГТУ с учетом технологических связей / А. Н. Михайлов, А. П. Пичко, Д. А. Михайлов и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 311-317.
11. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя. / Д. А. Михайлов. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – № 1(72). – С. 40-57.
12. Патент 2718877 РФ, С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. П. Пичко, Н. С. Пичко, В. И. Сухарев. – заявл. № 2018107164 от 26.02.2018; опубл.15.04.2020, Бюл. № 11. – 7 с.

Поступила в редколлегию 12.03.2021 г.