

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

DOI:10.30987/2223-4608-2021-10-28-38

Д.А. Михайлов, к.т.н.,¹ А.Н. Михайлов, д.т.н.,² Н.С. Пичко, д.филос.н.,³ Е.А. Шейко, к.т.н.¹
(¹Донецкая академия гражданской защиты МЧС ДНР, Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 34А,

²Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ул. Артёма, д. 58,

³УФ Ухтинского государственного технического университета, Россия, г. Усинск, ул. Нефтяников, д. 33)

E-mail: mitia3@donapex.net

Общие особенности технологического инжиниринга газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами структуры

Представлены общие особенности технологического инжиниринга газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами структурных элементов, которые обеспечивают повышение его ресурса в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий. Описана общая методика технологического инжиниринга газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами, формируемыми на базе комплексного многосвязного технологического процесса. Для реализации общей методики технологического инжиниринга газотурбинного двигателя описан алгоритм ее реализации с использованием итерационно-рекуррентного подхода.

Ключевые слова: функционально-ориентированные свойства; структура; газотурбинный двигатель; технологический инжиниринг; комплексная многосвязная технология.

D.A. Mikhaylov, Ph. D.,¹ A.N. Mikhaylov, Ph. D.,² N.S. Pichko, Dr. phil.,³ E.A. Sheiko, Ph. D.¹

(¹Donetsk Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the DPR, 34A, Rosa Luxemburg str., Donetsk, ²Donetsk National Technical University, 58, Artem str., Donetsk,

³UV of Ukhta State Technical University, 33 Neftyanikov str., Usinsk, Russia)

General features of technological engineering of a gas turbine engine with function-based structure properties

General features of technological engineering of a gas turbine engine with function-based properties of structural elements that provide an increase in its resource under the conditions of uneven operational impacts are presented. A general methodology of technological engineering of a gas turbine engine with function-based properties formed on the basis of a complex multi-connected technological process has been developed. In furtherance of the general methodology of technological engineering of a gas turbine engine, an algorithm for its implementation using an iterative-recurrent approach has been developed.

Keywords: function-based properties; structure; gas turbine engine; technological engineering; complex multi-connected technology.

Введение

В настоящее время развитие газотурбинных двигателей (ГТД) имеет комплексный характер, связанный, прежде всего, с улучшением их термогазодинамических параметров, формированием оптимальных схемно-конструктивных вариантов, обеспечением заданных или требуемых параметров рабочего процесса, созданием качественно новой совокупности их свойств, при одновременном обеспечении экологических параметров и расширения конъюнктуры рынка их продажи [1, 2]. Это обеспечивает создание компактных высокоэффективных ГТД с высокими удельными по-

казателями свойств и их характеристиками [3, 4].

Газотурбинный двигатель представляет собой сложную техническую систему, структура которой состоит из множества различных деталей, групп деталей, узлов и подсистем, которые выполняют в процессе эксплуатации заданные функции [1, 5]. Эта структура в процессе эксплуатации ГТД испытывает целый ряд неравномерных и не одинаковых эксплуатационных функций, которые снижают их технико-экономические параметры.

На рис. 1 представлены структурные особенности эксплуатации ГТД (ЭВ – эксплуатационные воздействия).

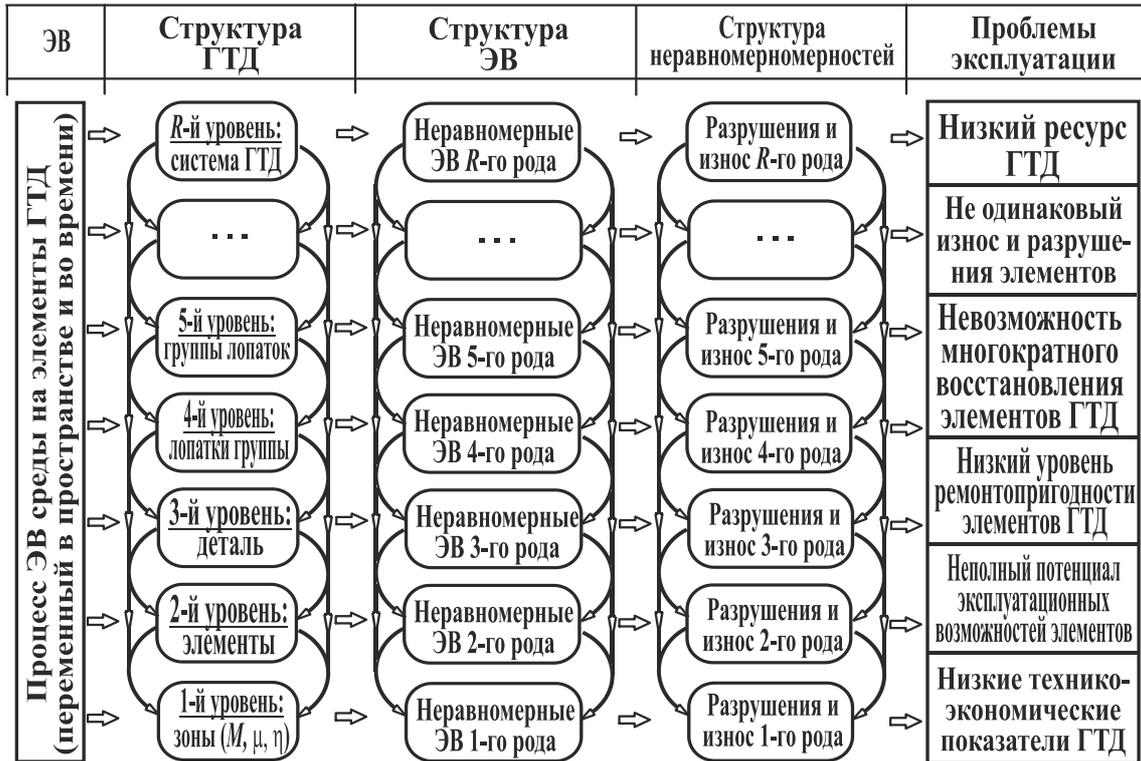


Рис. 1. Структурные особенности эксплуатации ГТД:
 ЭВ – эксплуатационные воздействия

Здесь показано, что в процессе действия эксплуатационных воздействий R-родов на элементы структуры ГТД R-уровней возникают неравномерные разрушения и износы R-родов. Эти особенности приводят к возникновению следующих проблем эксплуатации ГТД [5]: возникает низкий ресурс ГТД; появляется не одинаковый износ и разрушения элементов структуры ГТД; отсутствует возможность многократного восстановления элементов структуры ГТД; проявляется низкий уровень ремонтпригодности элементов структуры ГТД; происходит неполный потенциал эксплуатационных возможностей структуры ГТД; возникают низкие технико-экономические показатели эксплуатации ГТД.

Для повышения технико-экономических показателей ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций [2, 5], в работах [6 – 8] предложено обеспечивать функционально-ориентированные свойства (ФОС) структурных элементов (см. рис. 1) по их уровням. При этом в работе [7] формируют свойства лопаток на базе функционально-ориентированных покрытий из условия единовременного полного износа специального нитрид титанового покрытия для групп лопаток компрессора ГТД. В работах [9, 10] предлагается обеспечение ФОС

всех структурных составляющих ГТД (см. рис. 1) в зависимости от их уровней. Поэтому в этих работах для формирования ФОС структурных составляющих ГТД разработан общий подход и методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса (КМТП) обеспечения ФОС газотурбинного двигателя.

В соответствии с общей методологией обеспечения ФОС структурных элементов ГТД [10] процесс формирования свойств выполняется в четыре стадии. На первой стадии проектирования технологии и обеспечения ФОС определяются начальные данные для создания комплексного многосвязного процесса обеспечения ФОС структурных составляющих ГТД. Эти начальные данные определяются как композиция трех этапов жизненного цикла ГТД: технология изготовления; обеспечение ФОС; особенности эксплуатации. Решение вопросов синтеза ГТД на этих трех этапах его жизненного цикла составляет задачу технологического инжиниринга ГТД. На этой стадии проектирования определяются начальные параметры технологии изготовления, находят особенности обеспечения ФОС и устанавливаются особенности эксплуатации структурных элементов ГТД.

Поэтому в работе рассматриваются вопро-

сы получения начальных данных для обеспечения ФОС структурных составляющих ГТД, из условия его проектирования на базе общего критерия качества (равный ресурс; долговечность; надежность структурных элементов и т.п.). Эти вопросы составляют задачу технологического инжиниринга ГТД с ФОС его структурных элементов.

Целью данной работы является создание общей методологии технологического инжиниринга ГТД с ФОС структуры, заключающейся в комплексном композиционном анализе его особенностей эксплуатации, установлении технологических параметров и обеспечении свойств на основных этапах его жизненного цикла.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить анализ основных особенностей технологического инжиниринга ГТД с ФОС структуры; разработать общую методологию технологического инжиниринга ГТД с ФОС, формируемых на базе КМТП; предложить алгоритм общей методологии технологического инжиниринга ГТД с ФОС, базирующийся на итерационно-рекуррентном синтезе обеспечения.

Основные особенности технологического инжиниринга ГТД с ФОС структуры

Технологический инжиниринг ГТД с ФОС структуры заключается в установлении исходных данных, особенностей связей и обеспечения технологических параметров его иерархической структуры на множестве ее элементов на базе единого критерия свойств, формируемых на трех этапах жизненного цикла обеспечения, а именно технология изготовления, обеспечение ФОС и особенности эксплуатации. На базе технологического инжиниринга ГТД с ФОС решается проблема повышения эксплуатационных свойств в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций по уровням деления иерархической структуры авиационного двигателя. При этом установленные исходные данные позволяют в дальнейшем создавать комплексный многосвязный технологический процесс (КМТП) формирования ФОС ГТД.

Также следует отметить, что технологический инжиниринг процесса обеспечения ФОС структурным элементам ГТД заключается в комплексном решении триединой задачи – в условиях композиции параметров: эксплуатация, технология и свойства. Это позволяет решать вопросы управления, регулирования и

обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств ГТД и высоких их технико-экономических параметров деталей в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций на структурные составляющие ГТД [10].

К основным особенностям технологического инжиниринга ГТД с ФОС структуры можно отнести следующие:

1. Газотурбинный двигатель можно представлять иерархической структурой, состоящей из множеств элементов и уровней (см. рис. 1). На множестве элементов каждого уровня иерархической структуры ГТД действуют неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к неравномерному и не одинаковому износу и разрушению деталей авиационного двигателя (см. рис. 1). Функционально-ориентированные свойства ГТД нужно формировать по его иерархической структуре на базе единого критерия свойств, например, равной надежности, долговечности, ресурса и т.п.

2. Обеспечение ФОС структуре ГТД необходимо реализовывать на базе следующих этапов жизненного цикла ГТД (рис. 2): технология изготовления элементов (деталей) структуры; обеспечение ФОС структурным элементам; особенности эксплуатации структурных элементов.



Рис. 2. Основные этапы жизненного цикла ГТД

Совместная реализация особенностей процессов на трех этапах жизненного цикла ГТД является технологическим инжинирингом в обеспечении ФОС структуре двигателя с помощью КМТП [10].

3. Технологический инжиниринг ГТД с ФОС структуры является композицией основных этапов жизненного цикла ГТД (рис. 3).

На рис. 3 представлена схема композиционного синтеза ФОС структурных элементов ГТД посредством заданной технологии изготовления в зависимости от их особенностей эксплуатации.

4. Этапы жизненных циклов структурных элементов ГТД связаны между собой, как прямыми, так и обратными связями (рис. 4).



Рис. 3. Схема композиционного синтеза ФОС структурных элементов ГТД посредством заданной технологии изготовления в зависимости от их особенностей эксплуатации

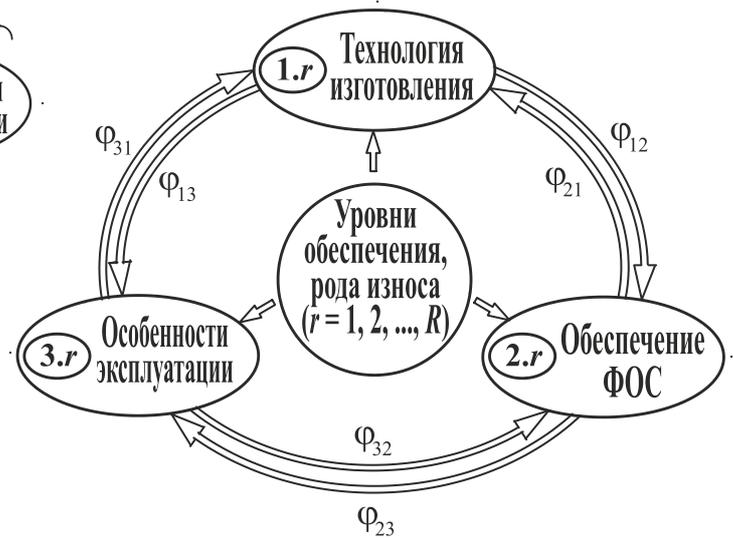


Рис. 4. Особенности связей основных этапов жизненного цикла ГТД на r -м уровне обеспечения структурных элементов

На рис. 4 показаны особенности связей основных этапов жизненного цикла ГТД на r -м уровне обеспечения структурных элементов.

5. Обеспечение ФОС на множестве элементов структуры ГТД выполняется на базе итерационно-рекуррентного подхода (рис. 5).

На рис. 5 представлена схема реализации итерационно-рекуррентных связей основных этапов жизненного цикла ГТД на r -м уровне структурных элементов.



Рис. 5. Итерационно-рекуррентные связи основных этапов жизненного цикла ГТД на r -м уровне структурных элементов

6. Обеспечение ФОС структуры ГТД выполняется на базе группы особых принципов функционально-ориентированных технологий [6] (рис. 6).

В процессе реализации группы особых принципов ориентации свойств, между ними

также могут действовать итерационно-рекуррентные связи.

7. Технологический инжиниринг ГТД с ФОС структуры обеспечивает следующие виды связей: связи на множестве структурных элементов; связи на множестве элементов каждого уровня структуры; связи на множестве уровней структуры; связи на множестве особых принципов ориентации технологических воздействий, обеспечения ФОС и особенностей эксплуатации структурного элемента; связи между этапами жизненного цикла структуры.

8. Технологический инжиниринг устанавливает исходные данные для проектирования КМТП обеспечения ФОС структуры ГТД [8 – 10].

Обеспечение ФОС множества структурных элементов ГТД должно выполняться на базе заданного общего критерия создания ГТД. К общему критерию создания ГТД можно отнести следующие [7 – 10]:

- равные эксплуатационные параметры всех структурных составляющих (элементов; поверхностей; деталей; деталей группы; групп деталей; подсистем ГТД);
- кратные эксплуатационные параметры всех структурных составляющих ГТД, или его групп, или его подсистем;
- функционально-зависимые эксплуатационные параметры всех структурных составляющих ГТД, или его групп, или его подсистем;
- специальные эксплуатационные параметры всех структурных составляющих ГТД, или его групп, или его подсистем.

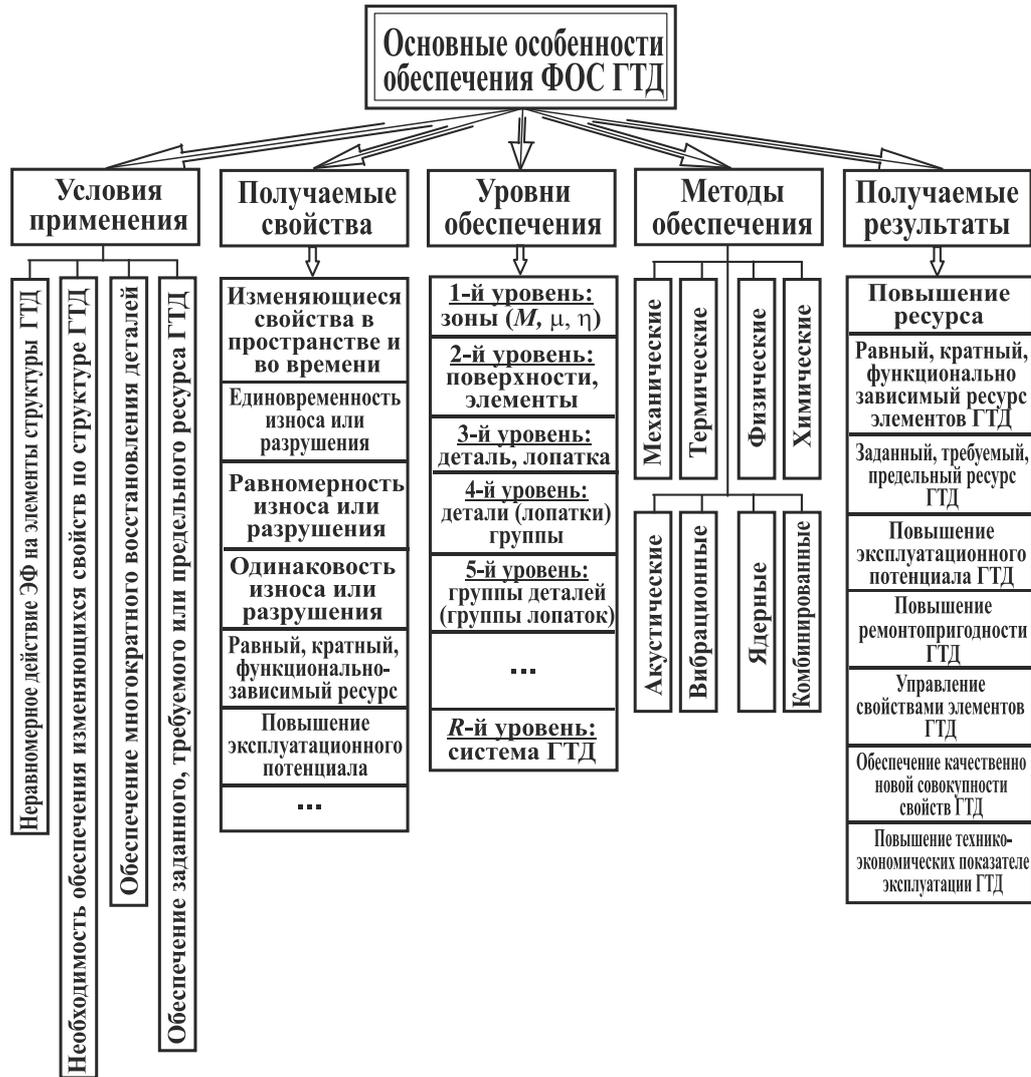


Рис. 6. Основные особенности обеспечения ФОС ГТД по уровням структурных элементов

Например, если процесс формирования ФОС структурных элементов ГТД реализуется в зависимости от заданного ресурса эксплуатации можно записать следующие выражения:

– для равного ресурса структурных элементов:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_i = \dots = R_n = R; \quad (1)$$

– для кратного ресурса структурных элементов:

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 = k_3 R_3 = \dots = k_i R_i = \dots = k_n R_n = R; \quad (2)$$

– для функционально-зависимого ресурса структурных элементов:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= f_1(R); \\ R_2 &= f_2(R); \\ R_3 &= f_3(R); \\ &\dots\dots\dots; \\ R_i &= f_i(R); \\ &\dots\dots\dots; \\ R_n &= f_n(R), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где R_i – ресурс i -го структурного элемента ГТД; k_i – коэффициент кратности для i -го структурного элемента ГТД; n – мощность множества структурных элементов ГТД (общее количество структурных элементов); $R_i = f_i(R)$ – функциональная зависимость ресурса i -го структурного элемента от общего ресурса ГТД; R – общий ресурс ГТД.

В качестве эксплуатационных параметров ГТД может быть принят обобщающий параметр свойств ГТД – надежность. Надежность является комплексным свойством, она может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, или определенные сочетания этих свойств [11, 12].

На основании этих свойств формируется общий критерий синтеза ГТД с ФОС его структурных элементов [7 – 10, 13].

Таким образом, технологический инжиниринг ГТД с ФОС решает комплексную задачу на базе композиции особенностей трех этапов жизненного цикла ГТД. При этом за счет ФОС

структурных элементов ГТД обеспечивается качественно новая совокупность его свойств. Это особенно потребно в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций по структурным элементам ГТД.

На рис. 6 представлены основные особенности обеспечения ФОС ГТД по уровням структурных элементов. Здесь показаны следующие основные составляющие этих особенностей: условия применения; получаемые свойства; уровни применения; методы обеспечения; получаемые результаты.

Условия применения ФОС структурным элементам ГТД могут быть следующими: происходит неравномерное действие эксплуатационных функций (ЭФ) на элементы структуры ГТД; возникает необходимость обеспечения изменяющихся свойств по структуре ГТД; требуется обеспечение многократного восстановления деталей; возникает потребность обеспечения заданного, требуемого или предельного ресурса структуры ГТД.

Получаемые свойства структуры ГТД могут иметь следующие параметры: изменяющиеся свойства (физико-механические; геометрические и т.п.) в пространстве и во времени; единовременность износа и разрушения элементов структуры ГТД; равномерность или одинаковость износа и разрушения элементов структуры ГТД; равный, кратный или функционально-зависимый ресурс (свойства) элементов структуры ГТД; повышение эксплуатационного потенциала ГТД и т.п.

Обеспечение ФОС структуры ГТД должно выполняться по всем уровням структуры, а именно на множестве уровней 1, 2, 3, ..., R (см. рис. 6). При этом получаемые свойства, могут выполняться следующими технологическими методами: механические; термические; физические; химические; акустические; вибрационные; ядерные и комбинированные.

Обеспечение ФОС структуры ГТД позволяет получать следующие результаты: повышение ресурса; равный, кратный или функционально-зависимый ресурс (свойства) элементов структуры ГТД; равный, требуемый или предельный ресурс ГТД; повышение эксплуатационного потенциала ГТД; повышение ремонтпригодности структуры ГТД; управление свойствами элементов структуры ГТД

при реализации технологии; обеспечение качественно новой совокупности свойств ГТД; повышение технико-экономических показателей эксплуатации ГТД.

Принципы обеспечения ФОС и особенности формирования связей

Главная задача обеспечения ФОС структуры ГТД это формирование на всех уровнях его структуры одинаковых, кратных или функционально зависимых эксплуатационных параметров (надежность; долговечность; ресурс; ремонтпригодность и т.п.) на базе единого критерия свойств. Это особенно необходимо для структурных составляющих ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий по уровням структуры ГТД. При этом обеспечение ФОС позволяет одновременно решать следующие вопросы:

- повышать свойства (например, увеличивать параметры физико-механических свойств материала деталей; увеличивать толщину покрытий деталей; делать изменяющуюся толщину покрытия слоя и т.п.) структурных составляющих ГТД в зонах, где действуют предельные нагрузки и максимальные эксплуатационные воздействия в зависимости от особенностей эксплуатации;

- обеспечивать выравнивание эксплуатационных свойств множества структурных элементов ГТД в каждом уровне и между различными уровнями структуры.

В соответствии с функционально-ориентированным подходом [6] для обеспечения ФОС структуре ГТД могут использоваться группа особых принципов ориентации свойств, причем на каждом уровне структуры двигателя:

1. Функциональной ориентации свойств.
2. Топологической ориентации свойств.
3. Количественной ориентации свойств.
4. Структурной ориентации свойств, и т.д., всего S принципов [6].

На рис. 7 представлена схема итерационно-рекуррентных связей принципов ориентации технологических воздействий и обеспечения ФОС в зависимости от особенностей эксплуатации ГТД по уровням его структурных элементов.

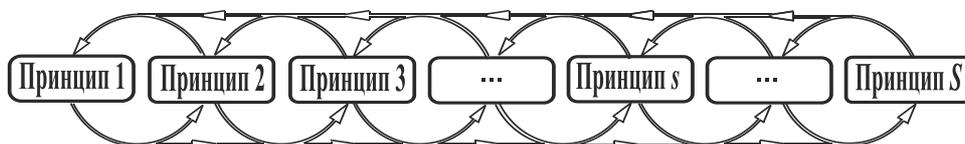


Рис. 7. Схема итерационно-рекуррентных связей принципов ориентации технологических воздействий и обеспечения ФОС в зависимости от особенностей эксплуатации ГТД по уровням его структурных элементов

В процессе реализации этой группы принципов (см. рис. 7) обеспечения ФОС по структурным элементам ГТД, они могут выполняться как все сразу, так и частично, а также по уровням обеспечения. При этом ФОС структурных элементов могут реализовываться как на всех уровнях структуры ГТД, так и частично, только по отдельным элементам.

В качестве примера, на рис. 8 представлена структурная схема реализации s -го принципа ориентации технологических воздействий (T) и ФОС (C) в зависимости от действия эксплуатационных функций (F) для группы особых принципов ($s = 1, 2, 3, \dots, S$).

Можно отметить, что ФОС на структурном элементе (лопатке) ориентируются на базе трех этапов жизненного цикла структуры: технологические воздействия (T) орудий и

средств обработки на лопатку; обеспечение свойств (C) элементам лопатки, в данном случае ФОС; эксплуатационные функции (F).

На базе принципа функциональной ориентации (см. рис. 8) обеспечивается функциональное соответствие особенностей действия эксплуатационной функции F на структурном элементе ГТД, характеристик реализации технологических воздействий T и параметров обеспечения свойств (ФОС) на данном структурном элементе ГТД каждого уровня структуры ГТД. То есть этот принцип обеспечивает заданные свойства структурного элемента в зависимости от действия эксплуатационных функций посредством требуемых технологических воздействий.

Между представленными этапами реализации данного принципа действуют прямые и обратные связи φ_{ij}^s , показанные на рис. 8.

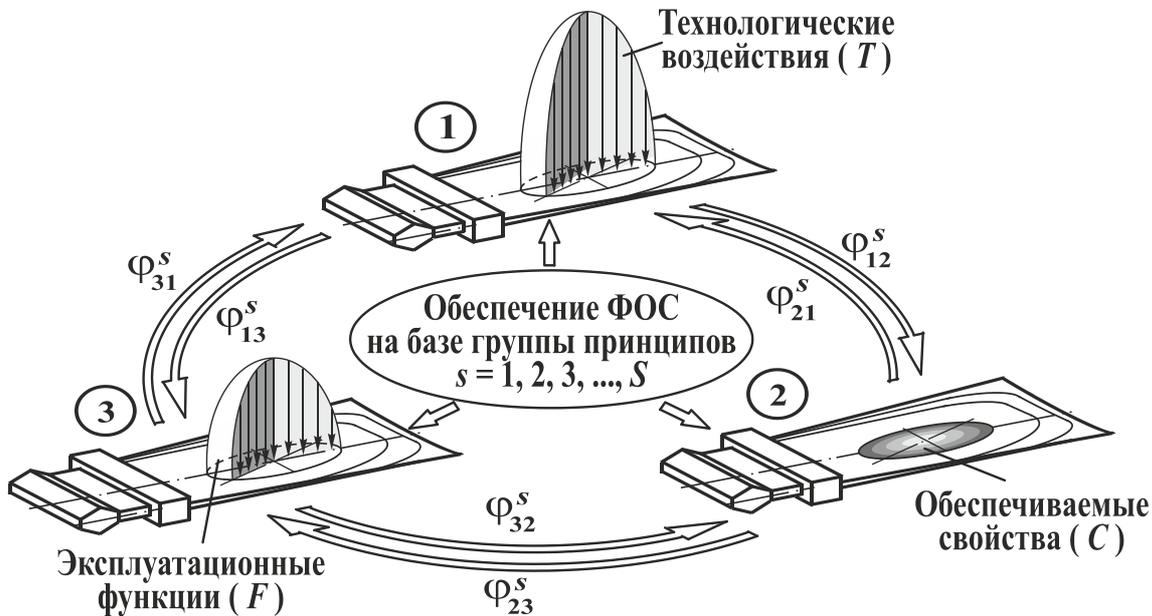


Рис. 8. Структурная схема реализации s -го принципа ориентации технологических воздействий (T) и ФОС (C) в зависимости от действия эксплуатационных функций (F) для группы особых принципов ($s = 1, 2, 3, \dots, S$)

Принцип функциональной ориентации технологических воздействий и обеспечения ФОС выполняется в зависимости от особенностей эксплуатации структурного элемента ГТД, а также действия прямых и обратных связей. Особенности реализации принципа функциональной ориентации можно представить с помощью следующих математических отображений:

– для прямых связей:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{12}^s &: T \rightarrow C; \\ \varphi_{23}^s &: C \rightarrow F; \\ \varphi_{31}^s &: F \rightarrow T, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

– для обратных связей:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{13}^s &: T \rightarrow F; \\ \varphi_{32}^s &: F \rightarrow C; \\ \varphi_{21}^s &: C \rightarrow T, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где φ_{12}^s – отображение, действующее с этапа технологического воздействия T в этап обеспечения свойств C структурного элемента ГТД для s -го принципа; φ_{23}^s – отображение, действующее с этапа обеспечения свойств C структурного элемента ГТД в этап действия эксплуатационных функций F для s -го принципа; φ_{31}^s – отображение, действующее с этапа эксплуатационных функций F структур-

ного элемента ГТД в этап технологического воздействия T для s -го принципа; φ_{13}^s – отображение, действующее с этапа технологического воздействия T в этап эксплуатационных функций F структурного элемента ГТД для s -го принципа; φ_{32}^s – отображение, действующее с этапа эксплуатационных функций F структурного элемента ГТД в этап обеспечения свойств C для s -го принципа; φ_{21}^s – отображение, действующее с этапа обеспечения свойств C структурного элемента ГТД в этап технологического воздействия T для s -го принципа.

Представленные системы отображений (4) и (5) имеют замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

Таким образом, обеспечение ФОС структурных элементов ГТД на базе общего критерия свойств должно реализовываться на множестве элементов каждого уровня структуры; на множестве уровней структуры авиационного двигателя; на множестве принципов ориентации ФОС структурных составляющих по трем этапам жизненного цикла ГТД.

Общая методика технологического инжиниринга формирования ФОС структуры ГТД

Предлагаемая методика технологического инжиниринга формирования ФОС структуры ГТД базируется на следующих особенностях:

1. На едином подходе в обеспечении ФОС структуре ГТД на основе общего критерия:

- на множестве элементов каждого уровня структуры;

- на множестве уровней структуры.

2. Обеспечение ФОС структуре ГТД выполняется на базе связей:

- на множестве элементов каждого уровня структуры;

- на множестве уровней структуры;

- на трех основных этапах жизненного цикла ГТД: технология изготовления; обеспечение ФОС; особенности эксплуатации.

3. Обеспечение ФОС структуре ГТД и реализация параметров технологического процесса выполняется в зависимости от особенностей эксплуатации структуры на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств деталей [6, 7].

4. Формирование ФОС ГТД выполняется на базе итерационно-рекуррентного подхода в

обеспечении заданных свойств структуры по следующим слоям проектирования:

- на множестве элементов каждого уровня структуры;

- на множестве уровней структуры;

- по трем основным этапам жизненного цикла ГТД: технология изготовления; обеспечение ФОС; особенности эксплуатации.

На основных этапах жизненного цикла ГТД, ФОС и параметры реализации технологии уточняются после каждого цикла итерации в зависимости от условий эксплуатации элементов каждого уровня и уровней структуры ГТД. Поэтому обеспечение ФОС структуры ГТД это композиционный процесс, решение которого можно находить:

- на объединении этапов жизненного цикла:

$$K_o = \bigcup_{\xi=1}^{K=3} k_{\xi};$$

- на пересечении этапов жизненного цикла:

$$K_p = \bigcap_{\xi=1}^{K=3} k_{\xi},$$

где K_o – композиционное решение, основанное на объединении этапов жизненного цикла ГТД; K_p – композиционное решение, основанное на пересечении этапов жизненного цикла ГТД; k_{ξ} – ξ -й этап жизненного цикла ГТД; $K=3$ – количество основных этапов жизненного цикла ГТД.

5. Технологический инжиниринг устанавливает начальные данные для проектирования КМТП обеспечения ФОС структуре ГТД. К начальным данным процесса проектирования КМТП можно отнести следующие:

- на этапе реализации технологического процесса: структура ГТД; методы обеспечения ФОС; структура КМТП; связи параметров реализации процессов, методов, операций; особенности изменения параметров свойств и т.п.;

- на этапе обеспечения ФОС: физико-механические параметры свойств структуры; особенности обеспечения свойств структуре; принципы обеспечения свойств; связи параметров свойств элемента, элементов каждого уровня, уровней структуры ГТД и т.п.;

- на этапе эксплуатации: особенности действия эксплуатационных воздействий на элементы каждого уровня структуры и уровни структуры ГТД; особенности абразивно-эрозионного, температурного и других видов износа и разрушения структуры ГТД и т.п.

Общая методика технологического инжиниринга формирования ФОС структуре ГТД имеет следующую последовательность:

1. Определяются исходные данные по технологическому инжинирингу ГТД с ФОС структуры: структура ГТД; материалы; физико-механические свойства деталей; геометрические параметры деталей; особенности действия эксплуатационных воздействий и т.п.

2. Обеспечивается выбор общего критерия обеспечения ФОС структуре ГТД. Этот процесс может выполняться на основе выражений (1) – (3) или других решений. При этом эти параметры могут выполняться комплексно, частично или комбинированно.

3. Определяются основные параметры структуры ГТД: мощность множества R -уровней структуры и множества I_r элементов структуры каждого r -го уровня структуры ГТД.

4. Выполняется реализация S принципов ориентации ФОС для структурных элементов первого уровня структуры, затем для структурных элементов второго уровня и т.д., пока не будут выполнены принципы ориентации для структурных элементов R -уровня. То есть на каждом r -том уровне структуры ГТД для каждого i_r -го структурного элемента реализуется группа принципов ориентации ФОС, состоящая из S принципов. В ряде случаев эти принципы могут выполняться частично, и не для всех деталей ГТД. Это обусловлено логической целесообразностью применения ФОС для деталей, не испытывающих изменяющиеся эксплуатационные функции, переменные во времени и в пространстве детали.

5. При реализации каждого принципа s ориентации ФОС каждого структурного элемента i_r каждого уровня r структуры ГТД выполняется процесс прохождения проектирования по трем этапам жизненного цикла (ЖЦ) ГТД:

– определение параметров технологических воздействий (ТВ): изменяющиеся параметры метода, операции, процесса; специальная оснастка для реализации специальных методов и операций технологического процесса; связи между технологическими параметрами методов, операций и процессов формирования ФОС и т.п.;

– определение заданных параметров ФОС: связи между свойствами структуры ГТД; пространственный контур границ зон обеспечения заданных параметров физико-механических свойств материала; число зон обеспечения заданных параметров физико-механических свойств материала; толщина покрытия материала зон со специальными свойствами и т.п.;

– установление особенностей действия экс-

плуатационных воздействий и износа структурных элементов ГТД: пространственный контур границ зон износа; число особых зон износа структурных элементов ГТД; толщина износа материала особых зон структуры ГТД; закономерности износа особых зон на каждом уровне структуры и по уровням всей структуры ГТД и т.п.

В этих условиях определяются связи методов, операций, технологических процессов (ТП) и ФОС структуры в зависимости от особенностей эксплуатации (ОЭ) ГТД,

6. Выполняется формирование базы начальных данных для синтеза КМТП. На основе начальных данных определяется следующее: связи технологических параметров обеспечения ФОС множества элементов (деталей) ГТД для КМТП; связи параметров ФОС структурных элементов каждого уровня и всех уровней структуры ГТД; закономерности износа и разрушения структурных элементов каждого уровня и всех уровней структуры ГТД.

Алгоритм формирования базы начальных данных для синтеза КМТП обеспечения ФОС структуры ГТД

На рис. 9 представлен алгоритм формирования базы начальных данных для синтеза КМТП обеспечения ФОС структуры ГТД (сокращенный вариант). Полный вариант алгоритма формирования базы данных имеет расширенную структуру.

Разработанный алгоритм технологического инжиниринга обеспечения ФОС структуре ГТД выполняется в следующей последовательности:

1. Задаются исходные данные процесса технологического инжиниринга в обеспечении ФОС структуре ГТД.

2. Производится выбор общего критерия обеспечения свойств ГТД.

3. Определяется мощность множества R уровней (количество уровней) структуры ГТД.

4. Задается параметр $r = 1$, который обозначает первый уровень структуры ГТД.

5. Выполняется определение множества I_r элементов структуры каждого r -го уровня.

6. Задается параметр $I_r = 1$, который обозначает первый элемент r -го уровня структуры ГТД.

7. Задается параметр $s = 1$, который обозначает первый принцип группы особых принципов ориентации ФОС.

8. Выполняется 1-й принцип ориентации ФОС.

9. Последовательно реализуется три этапа ЖЦ технологического инжиниринга, а именно: производится определение параметров

технологических воздействий орудий и средств обработки на элементы структуры ГТД; выполняется определение ФОС для элемента структуры ГТД; устанавливаются особенности ЭВ для элемента структуры ГТД.



Рис. 9. Алгоритм формирования базы начальных данных для синтеза КМТП обеспечения ФОС структуре ГТД (сокращенный вариант)

10. Устанавливаются связи параметров ТП и обеспечения ФОС для структурного элемента в зависимости от особенностей эксплуатации структуры ГТД.

11. Выполняется формирование базы начальных данных для синтеза КМТП обеспечения ФОС ГТД.

12. Назначается значение принципа ориентации $s = s + 1$, т.е. добавляется следующий принцип ориентации ФОС. Поэтому далее

выполняется 2-й принцип ориентации ФОС, потом 3-й принцип, и т.д., до тех пор, пока все S принципов не будут реализованы. При этом по каждому принципу ориентации каждый раз последовательно реализуются три этапа ЖЦ, приведенные в пункте 9 данной методики.

13. Если $s \leq S$ процесс реализации принципов ориентации ФОС повторяется, если $s > S$ процесс идет далее.

14. Назначается следующее значение принципа ориентации $s = s + 1$, т.е. добавляется следующий принцип ориентации ФОС.

15. Назначается значение параметра $i_r = i_r + 1$, т.е. добавляется номер следующего элемента уровня r структуры ГТД.

16. Если $i_r \leq I_r$ процесс повторяется для следующего структурного элемента r -го уровня структуры, если $i_r > I_r$ процесс идет далее.

17. Назначается следующее значение уровня структуры ГТД $r = r + 1$, т.е. добавляется следующий уровень структуры.

18. Если $r \leq R$ процесс повторяется для следующего уровня структуры ГТД, если $r > R$ процесс идет далее и переходит к завершению процесса *END*.

Представленный алгоритм позволяет формировать базу начальных данных синтеза КМТП обеспечения ФОС структуре ГТД. На рис. 9 буквами обозначено следующее: a_1 – обозначает выход процесса; a_2 – обозначает вход процесса (продолжение процесса).

Заключение

Описана общая методология технологического инжиниринга ГТД с ФОС структуры, которая базируется на комплексном композиционном анализе его особенностей эксплуатации, установлении технологических параметров и обеспечения свойств на основных этапах его жизненного цикла. Результатом этой работы является разработанный алгоритм формирования базы начальных данных синтеза КМТП обеспечения ФОС структурных составляющих ГТД. Проведенные исследования позволили выполнить следующее:

- представлен анализ основных особенностей технологического инжиниринга ГТД с ФОС структуры; технологический инжиниринг ГТД с ФОС структуры заключается в установлении исходных данных, особенностей связей и обеспечения технологических параметров его иерархической структуры на множестве ее элементов на базе единого критерия свойств, формируемых на трех этапах жизненного цикла обеспечения, а именно технология изготовления, обеспечение ФОС и особенности эксплуатации;

- установлено, что обеспечение ФОС структурных элементов ГТД на базе общего

критерия свойств реализуется на множестве элементов каждого уровня структуры, на множестве уровней структуры авиационного двигателя, на множестве принципов ориентации ФОС структурных составляющих по трем этапам жизненного цикла ГТД;

– разработана общая методология технологического инжиниринга ГТД с ФОС, формируемых на базе КМТП, базирующаяся на едином подходе на основе общего критерия свойств иерархической структуры авиационного двигателя;

– разработан алгоритм общей методологии технологического инжиниринга ГТД с ФОС, базирующийся на итерационно-рекуррентном синтезе обеспечения, который позволяет формировать базу начальных данных синтеза КМТП обеспечения ФОС структуры ГТД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Вертолетные** газотурбинные двигатели. / В.А. Григорьев и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
2. **Богуслаев, В.А., Яценко, В.К., Притченко, В.Ф.** Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – 335 с.
3. **Технология** производства авиационных двигателей: ч. II. Основы проектирования технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей и технологическая подготовка производства. / В.А. Богуслаев и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 557 с.
4. **Демин, Ф.И., Проничев, Н.Д., Шитарев, И.Л.** Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
5. **Михайлов, Д.А.** Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2014. – №4 (50). – С. 126-131.
6. **Михайлов, А.Н.** Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
7. **Михайлов, Д.А., Хандожко, А.В., Шейко, Е.А., Недашковский, А.П., Михайлов, А.Н.** Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2014. – №4 (50). – С. 132-139.
8. **Михайлов, А.Н., Михайлов, Д.А., Шейко, Е.А., Михайлов, В.А.** Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – №1 (103). – С. 40-48.
9. **Михайлов, Д.А., Шейко, Е.А., Михайлов, В.А., Михайлов, А.Н.** Общий подход синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинных двигателей // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXVII международной научно-техн. конф. в г. Севастополе. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 235-253.
10. **Михайлов, Д.А.** Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – №1 (72). – С. 40-57.
11. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Су-

лов и др. / Под общей ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

12. **Сулов, А.Г.** Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 400 с.

13. **Патент № 2718877.** Российская Федерация. 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 / Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бул. №11. – 15.04.2020. – 7 с.

REFERENCES

1. Helicopter gas turbine engines. / V. A. Grigoriev et al. - Moscow: Mashinostroenie, 2007, 491 p.
2. Boguslaev, V. A., Yatsenko, V. K., Pritchenko, V. F. Technological support and forecasting of the bearing capacity of GTD (gas turbine engine) parts, Zaporozhye, JSC "Motor Sich", 2006, 335 p.
3. Production technology of aircraft engines: Part II. Fundamentals of designing technological processes for manufacturing aircraft engine parts and technological preparation of production. / V. A. Boguslaev et al., Zaporozhye: JSC "Motor Sich", 2007, 557 p.
4. Demin, F. I., Pronichev, N. D., Shitarev, I. L. Technology of manufacturing the main parts of gas turbine engines, Moscow: Mashinostroenie, 2002, 328 p.
5. Mikhailov, D. A. The main features of the operation of the gas turbine compressor blades and the classification of their operational functions // *Progressivniye tehnologii i sistemi mashinostroeniya*, 2014, no. 4, (50), pp. 126-131
6. Mikhailov, A. N. Fundamentals of the synthesis of function-based engineering technologies, Donetsk: DonNTU, 2009, 346 p.
7. Mikhailov, D. A., Khandozhko, A.V., Sheiko, E. A., Nedashkovsky, A. P., Mikhailov, A. N. A general approach to ensuring the function-based properties of the GTE compressor blades based on the principle of one-time complete wear of the coating // *Progressivnie tehnologii i sistemi mashinostroeniya*, 2014, no. 4 (50), pp. 132-139.
8. Mikhailov, A.N., Mikhailov, D.A., Sheiko, E.A., Mikhailov, V.A. Structural synthesis of a complex multiconnected technological process for processing compressor blades of gas turbine engines with function-based coatings // *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2020, no.1 (103), pp. 40-48.
9. Mikhailov, D.A., Sheiko, E.A., Mikhailov, V.A., Mikhailov, A.N. A general approach to the synthesis of a complex multi-connected technological process for providing function-based properties of gas turbine engines // *Mechanical Engineering and technosphere of the XXI century: Proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference in Sevastopol*, Donetsk: DonNTU, 2020, pp. 235-253.
10. Mikhailov, D.A. General methodology for the synthesis of a complex multi-connected technological process for providing function-based properties of a gas turbine engine // *Progressive technologies and systems of mechanical engineering*, 2021, no.1 (72), pp. 40-57.
11. Technological support and improvement of operational properties of parts and their connections / A. G. Suslov et al., edited by A. G. Suslov, M.: Mashinostroenie, 2006, 448 p.
12. Suslov, A. G. Technology of mechanical engineering: A textbook for students of engineering specialties of universities, M.: Mechanical Engineering, 2004, 400 p.
13. Patent No. 2718877, RF, C23C 14/04. Method of applying a function-based wear-resistant coating to the blade of a gas turbine engine / A. N. Mikhailov, D. A. Mikhailov, V. A. Mikhailov, E. A. Sheiko, A. P. Pichko, N. S. Pichko, V. I. Sukharev / Application No. 2018107164 of 26.02.2018, Bul. No. 11, 15.04.2020, 7 p.

Рецензент д.т.н.
Сергей Петрович Ерньоко