

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц.

ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР

Тел./Факс: +38 (071) 3821135; E-mail: [mitia3@donapex.net](mailto:mitia3@donapex.net)

## ОБЩАЯ МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА КОМПЛЕКСНОГО МНОГОСВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В представленной работе разработана общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств структурных элементов газотурбинного двигателя. В статье приведены данные по созданию комплексного технологического подхода повышения эксплуатационных свойств газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами. Выполнен анализ особенностей обеспечения функционально-ориентированных свойств деталей газотурбинного двигателя на базе решения задачи технологического инжиниринга и реализации равного ресурса структурных элементов авиационного двигателя. Приведены основные стадии, этапы и особенности синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств структурных элементов газотурбинного двигателя. Связность комплексного технологического процесса обеспечивает возможность управления свойствами структурных элементов двигателя на стадии формирования технологии из условия равного ресурса его деталей.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, структура, функционально-ориентированные свойства, технологический инжиниринг, комплексный подход, равный ресурс, многосвязная технология.

D. A. Mikhaylov

## GENERAL METHODOLOGY OF SYNTHESIS OF A COMPLEX MULTICONNECTED TECHNOLOGICAL PROCESS OF PROVIDING FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES OF A GAS TURBINE ENGINE

In the presented work, a general methodology for the synthesis of a complex multi-connected technological process of providing functionally oriented properties of the structural elements of a gas turbine engine has been developed. The article provides data on the creation of an integrated technological approach to improve the operational properties of a gas turbine engine with functionally oriented properties. The analysis of the features of ensuring the functionally oriented properties of gas turbine engine parts based on solving the problem of technological engineering and the implementation of an equal resource of structural elements of an aircraft engine. The main stages, stages and features of the synthesis of a complex multi-connected technological process of providing functionally-oriented properties of the structural elements of a gas turbine engine are presented. The connectivity of the complex technological process provides the ability to control the properties of the structural elements of the engine at the stage of technology formation from the condition of equal resource of its parts.

**Keywords:** gas turbine engine, structure, functionally oriented properties, process engineering, integrated approach, equal resource, multiply connected technology.

### 1. Введение

Авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой сложную техническую систему, состоящую из множества деталей, групп деталей, узлов и подсистем, выполняющих заданные эксплуатационные функции [1, 2, 3]. Общее количество различных деталей в ГТД может превышать несколько тысяч штук, которые в ряде случаев, являются очень сложными и дорогими в изготовлении [4, 5, 6].

Выполненные ранее исследования особенностей эксплуатации ГТД позволили установить, что они эксплуатируются в сложных условиях, при этом этот процесс должен обеспечивать гарантированный ресурс авиационного двигателя. Можно отметить, что особенно в сложных условиях работают турбовальные вертолетные ГТД. Это свя-

зано с тем, что их работа характеризуется сложными особенностями эксплуатации вертолетов и обусловлена более высокой концентрацией абразивно-эрозионных воздействий на основные детали по тракту двигателя [3, 5]. В работах [6, 7, 8] установлено, что на элементы, детали, группы деталей и подсистемы действуют неравномерные эксплуатационные функции. Особенно это значительно проявляется на деталях, расположенных по проточной части (тракту) двигателя в зонах действия пыли газозвдушного потока среды. Это снижает технико-экономические показатели вертолетных газотурбинных двигателей и вызывает необходимость в повышении ресурса ГТД.

Для решения вопроса повышения эксплуатационных свойств ГТД в работах [6, 7, 8, 9] предлагается обеспечивать функционально-ориентированные свойства (ФОС)

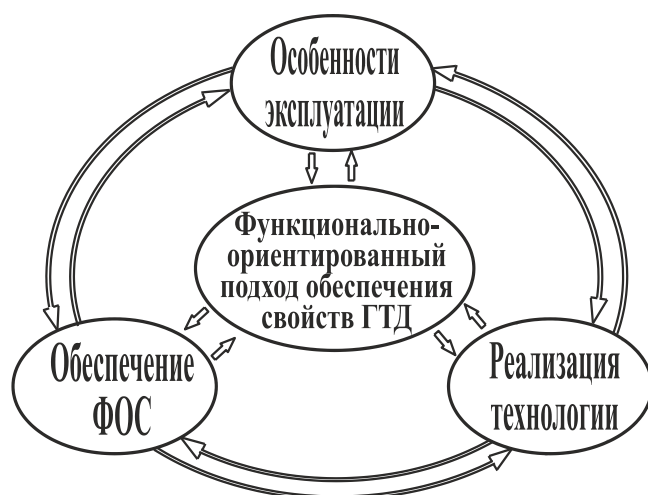


Рисунок 1. Схема реализации функционально-ориентированного подхода в обеспечении свойств структурным составяющим ГТД

отдельным деталям и группам лопаток авиационных двигателей. ФОС деталей ГТД позволяют решать вопросы повышения эксплуатационных свойств ГТД в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий различного характера [6, 7, 8, 9]. При этом на базе реализации ФОС деталям ГТД возможно решение вопросов повышения, обеспечения и управления свойствами деталей путем выполнения равного, кратного ресурса деталей, единовременного износа покрытия в соответствии с заданными условиями эксплуатации, обеспечения равномерного или одинакового износа поверхностного слоя деталей. Однако для решения этих вопросов необходим специальный подход, а именно функционально-

ориентированный подход в обеспечении свойств ГТД (рис. 1).

Функционально-ориентированный подход заключается в комплексном решении вопросов обеспечения ФОС структуре ГТД с учетом следующих циклов (рис. 1): анализ особенностей эксплуатации, реализация технологии, обеспечение ФОС. Можно отметить, что это инжиниринговая задача в создании ГТД с ФОС основных элементов и деталей ГТД.

Также следует отметить то, что для изготовления заданного множества деталей, групп деталей и подсистем необходимо множество технологических процессов изготовления этих деталей. При этом для обеспечения равного или кратного ресурса деталей, групп деталей и подсистем необходимо это множество технологических процессов изготовления деталей связать определенными параметрами. Поэтому здесь, необходимо создавать комплексный многосвязный технологический процесс изготовления деталей ГТД [8, 9, 10], который бы позволил решать вопросы обеспечения ФОС с учетом трех жизненного цикла ГТД, а именно: эксплуатация, технология, обеспечение ФОС (рис. 1).

Выполненный анализ особенностей обеспечения ФОС деталей ГТД позволил установить, что для решения вопросов повышения технико-экономических показателей ГТД достаточно выполнение ФОС только части деталей. На рис. 2 представлена схема определения рационального объема обеспечения ФОС элементам структуры ГТД:

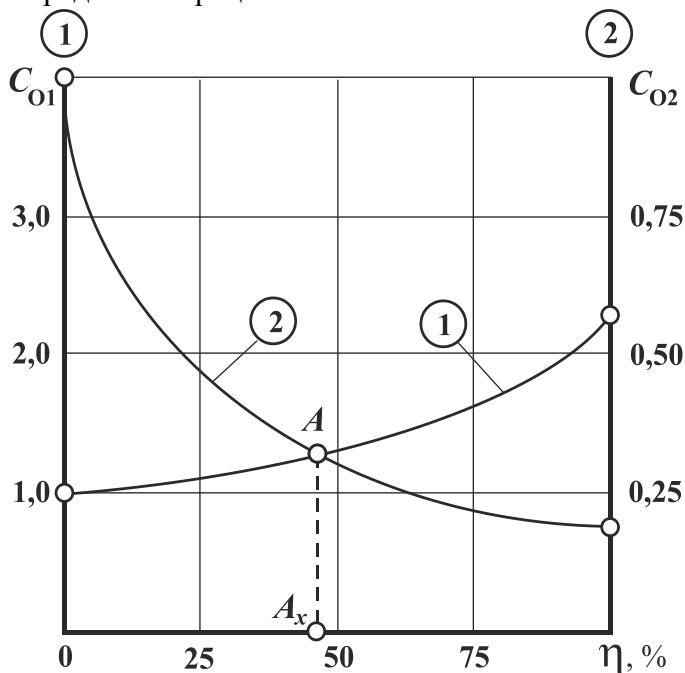


Рисунок 2. Схема определения рационального объема обеспечения ФОС элементам структуры ГТД: 1 – зависимость относительной стоимости  $C_{01}$  изготовления ГТД от % его деталей с ФОС; 2 – зависимость относительной себестоимости  $C_{02}$  эксплуатации ГТД от % его деталей с ФОС

зависимость относительной стоимости  $C_{01}$  изготовления ГТД от % его деталей с ФОС; 2 – зависимость относительной себестоимости  $C_{02}$  эксплуатации ГТД от % его деталей с ФОС. На основании этих данных можно отметить, что достаточно обеспечение ФОС ГТД в пределах 45 ... 50 % от общего количества его деталей. При этом процесс обеспечения ФОС должен быть направлен на основные детали ГТД, такие как лопатки компрессора, турбины, свободной турбины, детали камеры сгорания и тому подобные, расположенные по тракту двигателя.

Вместе с тем, для создания комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуре деталям ГТД необходима общая методология, общий подход создания этой технологии, принципы и методы проектирования общей комплексной технологии обеспечения ФОС деталям

на базе анализа особенностей их эксплуатации в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий семи родов [11].

Целью данной работы является создание общей методологии синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структуре деталей ГТД на основе действующих закономерностей и связей в процессе эксплуатации, технологии и обеспечения свойств структуры на множестве технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей и реализации заданных, требуемых или предельных свойств ГТД.

Для достижения поставленной цели в работе планируется решение следующих задач: выполнить анализ особенностей применения деталей с ФОС для ГТД; предложить общую методологию синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структурным элементам ГТД; разработать общие подходы и принципы синтеза по основным стадиям проектирования в общей методологии создания комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структурным элементам ГТД.

## 2. Общая методология повышения технико-экономических показателей ГТД на базе единого комплексного подхода

Процесс проектирования технологии обеспечения заданных свойств структуре ГТД представляет собой сложную многокритериальную задачу, связанную с комплекс-

ным проектированием на множестве технологических процессов изготовления множества деталей ГТД с ФОС [2] на базе решения единой задачи повышения технико-экономических показателей изготовления, эксплуатации и обеспечения ФОС.

Можно отметить, что для решения вопросов повышения технико-экономических показателей ГТД на базе обеспечения ФОС структурным элементам ГТД необходимо решать следующие задачи:

1. Для обеспечения ФОС элементам структуры ГТД необходимо комплексно решать вопросы обеспечения свойств по следующим жизненным циклам процесса (рис. 1): особенности эксплуатации деталей ГТД, реализация технологии изготовления деталей, обеспечение ФОС деталям ГТД.

2. ГТД состоит из множества деталей и подсистем, причем для изготовления их необходимо множество технологических процессов обеспечения ФОС. При этом для обеспечения вопросов управления свойствами деталей относительно друг друга в ГТД необходим комплексный многосвязный технологический процесс, который был бы связан и позволял управлять свойствами деталей ГТД на этапе их изготовления. Здесь, необходимо установить связи [6, 8] параметров отдельных технологических процессов изготовления деталей в зависимости от закономерностей абразивно-эрозионного износа или разрушения деталей при эксплуатации ГТД [7].

Следует отметить, что эти две задачи связаны между собой и представляют собой единый общий подход в создании комплексного многосвязного технологического процесса (КМТП) обеспечения ФОС структурным составляющим ГТД. При этом, так как в первой задаче решаются вопросы обеспечения ФОС деталям ГТД в условиях трех жизненных циклах ГТД, а именно: эксплуатация, технология, свойства, то она, по сути дела, является технологическим инжинирингом в обеспечении ФОС структурным элементам ГТД на базе функционально-ориентированного подхода (ФОП).

Для решения вопросов повышения технико-экономических показателей ГТД в работе разработана общая методология синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структурным элементам ГТД. Эта методология базируется на композиции двух подходов (рис. 3):

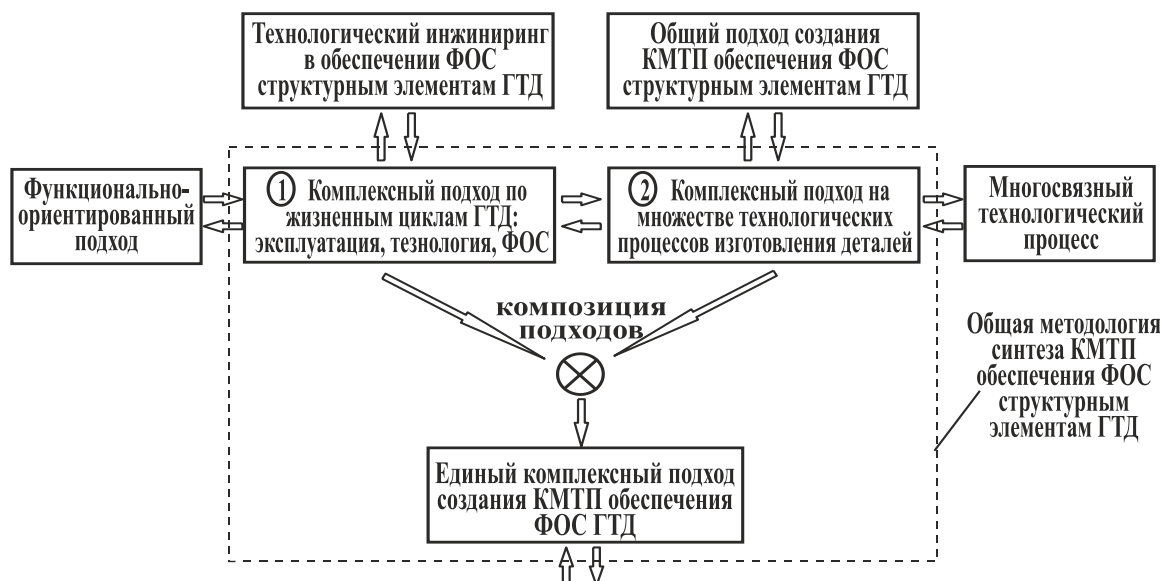
- комплексного подхода по жизненным циклам ГТД на базе функционально-ориентированного подхода (технологический инжиниринг ГТД с ФОС, устанавливающий закономерности износа и разрушения деталей при эксплуатации ГТД, связи в обеспечении параметров технологии и обеспечение ФОС);

- комплексный подход на множестве технологических процессов изготовления деталей с ФОС, обеспечивающий реализацию КМТП.

Отметим, что реализация единого комплексного подхода создания КМТП обеспечения ФОС структурным элементам ГТД (рис. 3) позволяет решать следующее:

1. Управлять свойствами деталей ГТД на этапе реализации технологии.
2. Обеспечивать равный и/или кратный и/или функционально-зависимый ресурс структурным элементам ГТД.
3. Обеспечивать заданный, требуемый или предельный ресурс ГТД.
4. Обеспечивать ограниченный ресурс ГТД в зависимости от технических условий его эксплуатации.

5. Обеспечивать полный эксплуатационный потенциал всех структурных элементов ГТД.



**Особенности применения единого комплексного подхода:**

1. Управление свойствами деталей ГТД на этапе реализации технологии.
2. Обеспечение равного и/или кратного ресурса структурным элементам ГТД.
3. Обеспечение заданного, требуемого или предельного ресурса ГТД.
4. Обеспечение ограниченного ресурса ГТД в зависимости от технических условий его эксплуатации.
5. Обеспечение полного эксплуатационного потенциала всех структурных элементов ГТД.
6. Обеспечение повышения технико-экономических показателей ГТД.
7. Повышает ремонтпригодность структурных элементов ГТД.
8. Обеспечение качественно новой совокупности свойств ГТД, и решение других вопросов.

Рисунок 3. Гипотетическая схема композиции общей методологии синтеза КМТП обеспечения ФОС структурным элементам ГТД

6. Обеспечивать повышение технико-экономических показателей ГТД.
7. Повышать ремонтпригодность структурных элементов ГТД.
8. Обеспечивать качественно новую совокупность свойств ГТД и решение других вопросов.

На рис. 4 представлена схема системного синтеза КМТП обеспечения ФОС элементам структуры ГТД. Здесь, при создании КМТП необходимо установить следующие данные:

1. Эксплуатационные особенности структурных составляющих. Возникающие проблемы:
  - наличие неравномерного, неодинакового, неоднородного износа и разрушения элементов структуры ГТД;
  - необходимость обеспечения единого подхода для этапов жизненного цикла ГТД: эксплуатация, технология, свойство;
  - невозможность значительного повышения, обеспечения, управления технико-экономическими (ТЭ) параметрами деталей ГТД с традиционными свойствами;
  - .....
  - низкие ТЭ показатели ГТД с традиционными свойствами.

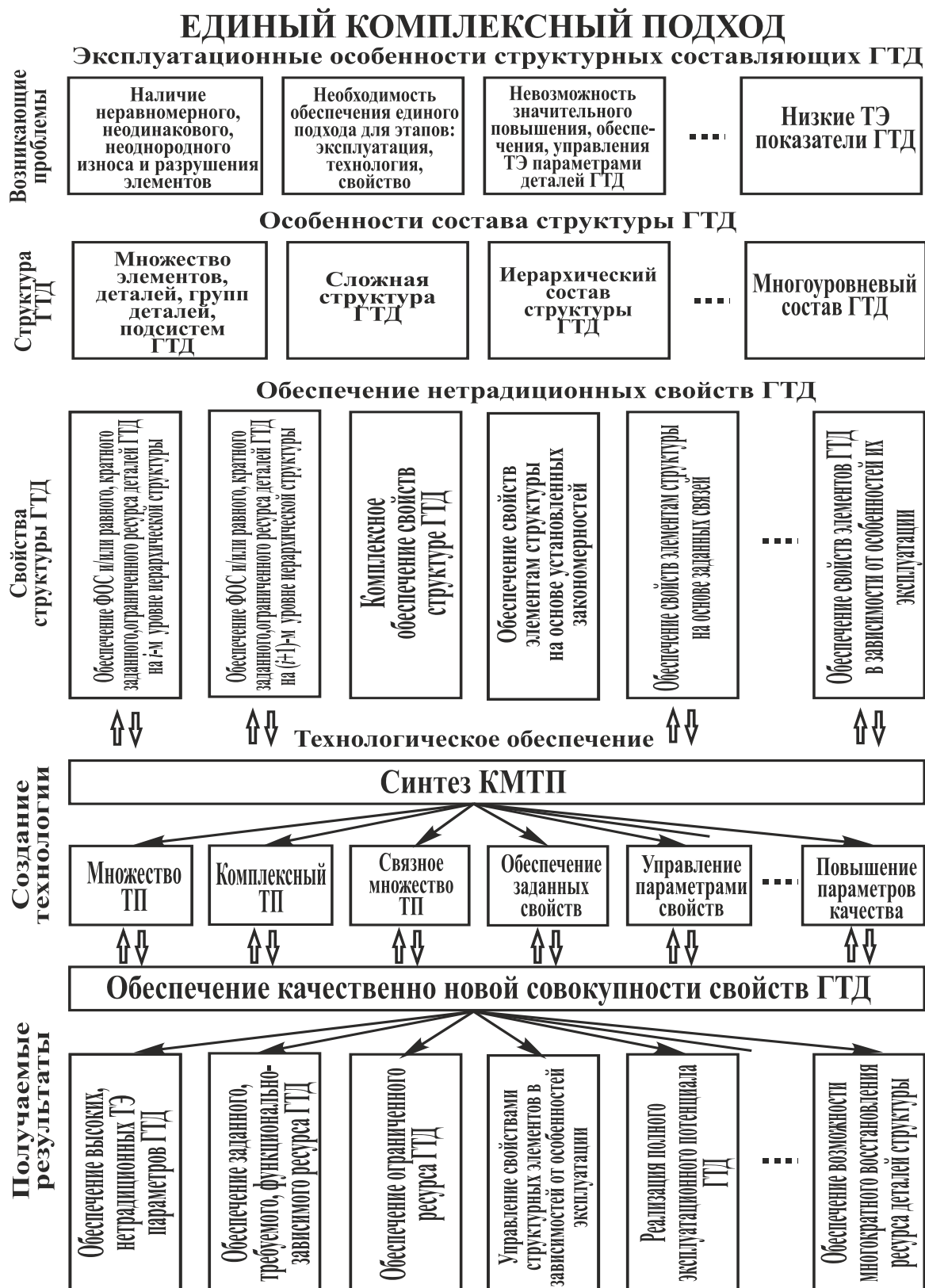


Рисунок 4. Схема системного синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС элементам структуры ГТД

2. Особенности состава структуры ГТД:
  - множество элементов деталей, групп деталей, подсистем ГТД;
  - сложная структура ГТД;
  - иерархическая состав структуры ГТД;
  - .....;
  - многоуровневый состав ГТД.
3. Обеспечение нетрадиционных свойств ГТД на базе ФОП с обеспечением ФОС (комплексный подход по жизненным циклам ГТД: эксплуатация, технология, свойства).
4. Синтез КМТП. В этом случае, управляемыми параметрами создаваемой технологии является следующее:
  - множество технологических процессов (ТП);
  - комплексный ТП;
  - связное множество ТП;
  - обеспечение заданных свойств;
  - управление параметрами свойств;
  - .....;
  - повышение параметров качества.



Рисунок 5. Стадии проектирования комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС ГТД с итерационно-рекуррентными связями

решать задачи технологического инжиниринга, определения технологических параметров процесса и обеспечения ФОС структурным элементам ГТД с учетом прямых, обратных и обратных связей процесса (рис. 5).

5. Особенности выполнения обеспечения качественно новой совокупности свойств структурным элементам ГТД. Это комплекс различных свойств деталей ГТД.

Предлагаемая методология учитывает особенности эксплуатации элементов ГТД, технологию реализации заданных свойств и обеспечение ФОС. При этом она базируется на следующих стадиях проектирования (рис. 5):

I-я стадия проектирования - технологический инжиниринг процесса.

II-я стадия проектирования - разработка общего подхода синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структурным составляющим ГТД.

III-я стадия проектирования - синтез технологического обеспечения комплексной многосвязной технологии формирования ФОС структурным составляющим ГТД.

IV-я стадия проектирования – обеспечение заданных технико-экономических параметров структурным элементам ГТД.

Можно отметить, что представленные на рис. 5 стадии проектирования комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС связаны между собой итерационно-рекуррентными связями. Это позволяет последовательно – пошагово

### **3. Технологический инжиниринг процесса: композиционный синтез технологии и обеспечения ФОС, установление принципов проектирования, определение исходных данных**

На I-ой стадии проектирования (рис. 5) определяются начальные параметры (данные) – особенностей (закономерностей) износа (разрушения) элементов каждой детали ГТД, устанавливаются параметры и связи между структурой композиционного технологического процесса и особенности обеспечения ФОС по следующим жизненным циклам ГТД (рис. 1):

1. Эксплуатационные особенности.
2. Технологическое обеспечение.
3. Обеспечение ФОС.

Технологический инжиниринг ГТД заключается в установлении закономерностей износа (разрушения) деталей при их эксплуатации, определении связей в обеспечении параметров операций технологии и реализации ФОС структурным элементам авиационного двигателя. То есть на этой стадии определяются начальные данные - закономерности износа элементов детали при эксплуатации, определяются технологические параметры и связи между операциями множества технологических процессов изготовления множества деталей ГТД при реализации КМТП и определяются особенности обеспечения ФОС элементам структуры ГТД. Например, для напыления функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора ГТД, начальные данные, а именно закономерности напыления покрытий, параметры слоев покрытия определяются в соответствии с данными, представленными в работе [12]. Следует отметить, что на элементы ГТД при эксплуатации действуют неравномерности эксплуатационных воздействий 7-ми родов, что приводит к неравномерному износу и разрушению зон, поверхностей, элементов деталей, поверхностей, деталей, деталей в группе, групп деталей относительно друг друга, подсистем ГТД [7, 10, 11].

Можно также 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.

Таким образом, технологический инжиниринг при создании КМТП обеспечения ФОС элементам структуры ГТД заключается в установлении начальных данных, а именно:

- устанавливаются закономерности износа или разрушения структурных элементов ГТД при эксплуатации;
- определяются связи параметров реализации операций и технологических процессов на множестве деталей ГТД;
- обеспечивается реализация ФОС деталей ГТД на множестве технологических процессов КМТП.

На рис. 6 представлены особенности технологического инжиниринга процесса проектирования ГТД с ФОС деталей и подсистем. Здесь можно отметить, что решение вопросов технологического инжиниринга решается на базе композиции жизненных циклов ГТД. При этом ядро процесса это композиция трех жизненных циклов ГТД, на базе которого образуется качественно новое свойство ГТД:

1. Эксплуатационные особенности.



2. Технологическое обеспечение.
3. Обеспечение свойств (ФОС).

Заметим, что между этими циклами действуют связи (рис. 6), при этом они должны быть итерационно-рекуррентными, иметь прямые, обходные и обратные связи.

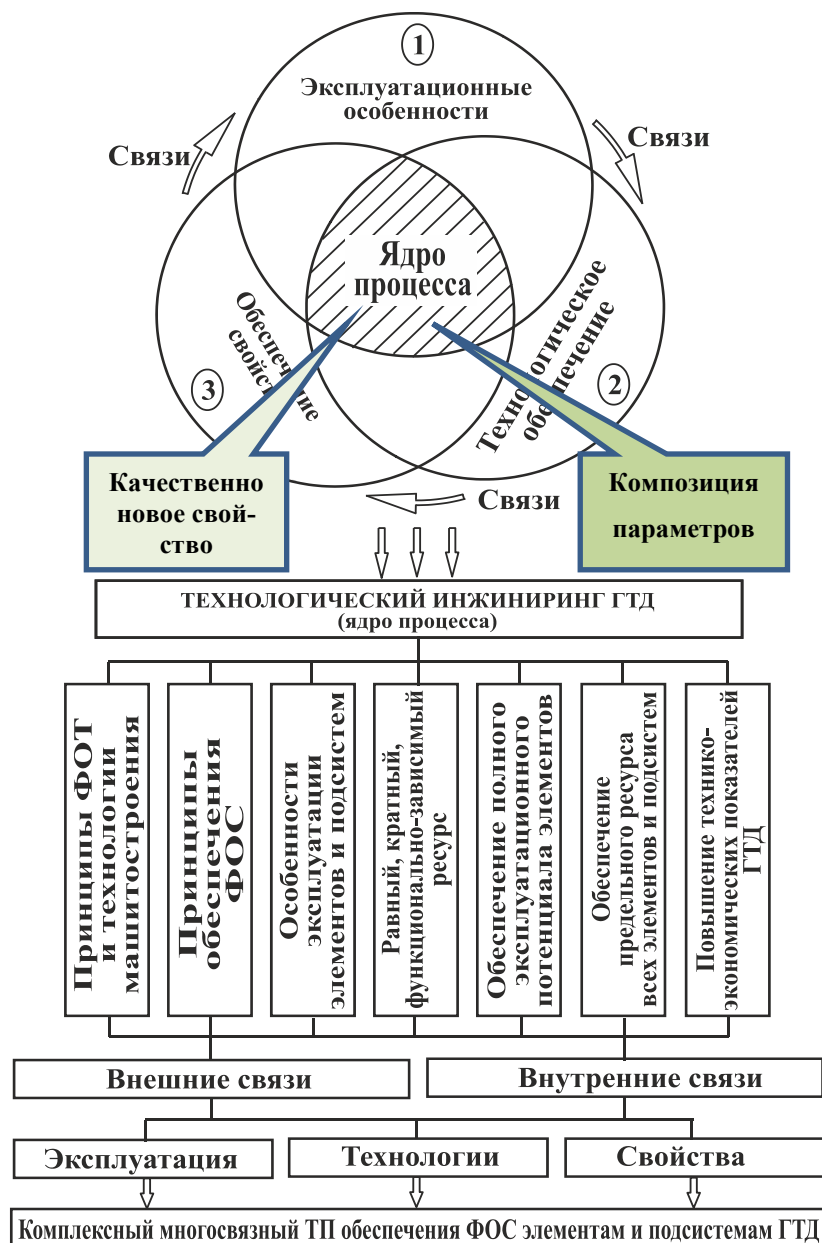


Рисунок 6. Особенности технологического инжиниринга процесса проектирования ГТД с ФОС

элементам ГТД базируется на следующих принципах ориентации эксплуатационных особенностей, технологических воздействий и свойств структурных элементов ГТД [2, 11]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе изделия, характеристик реализации техноло-

Также следует иметь в виду, что технологический инжиниринг ГТД с ФОС их структурных элементов базируется на следующем:

- принципах ориентации функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [2] и технологии машиностроения;
- принципах обеспечения ФОС [9, 10];
- особенностях эксплуатации элементов и подсистем ГТД [6, 7, 8];
- обеспечении равного, кратного или функционально-зависимого ресурса структурных элементов ГТД;
- обеспечении полного эксплуатационного потенциала элементов структуры ГТД;
- обеспечении заданного, требуемого или предельного ресурса ГТД;
- повышении технико-экономических показателей ГТД и других параметров.

Обеспечение ФОС структурным эле-

гических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе изделия.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента изделия, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зонального элемента, реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на изделие и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств.

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах изделия.

4. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах изделия из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всего изделия.

На рис. 6 показано наличие внешних и внутренних связей процессов в технологическом инжиниринге ГТД с ФОС. Здесь можно отметить, что внешние связи действуют между жизненными циклами ГТД (рис. 1), внутренние связи действуют внутри каждого цикла реализации ФОС элементной базы ГТД.

#### **4. Общий подход синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС ГТД из условия равенства, кратности или функциональной зависимости ресурса**

КМТП обеспечения ФОС структурным элементам ГТД – это связанное множество технологических процессов изготовления его отдельных структурных составляющих, связанных друг с другом посредством внешних и внутренних иерархических связей. При этом мощность множества технологических процессов определяется числом деталей ГТД участвующих в обеспечении его ФОС. Причем внешние связи устанавливаются между основными этапами жизненного цикла ГТД, а именно: эксплуатация, технология и обеспечение свойств, а внутренние связи – внутри этих этапов по иерархической структуре деталей составляющих ГТД.

На II-ой стадии проектирования КМТП разрабатывается общий подход его синтеза [10]. Он базируется на 3-х этапах синтеза:

1-й этап: Разрабатывается системная модель синтеза КМТП. На основе этой модели устанавливаются внутренние и внешние связи в системе: эксплуатация, технология, свойства.

2-й этап: Разрабатывается общая схема формирования свойств в ГТД для его работы в условиях действия неравномерностей 7-ми родов. Эта общая схема базируется на принципах обеспечения ФОС для отдельных деталей и специальных свойств структуры системы.

3-й этап: Разрабатывается структурная схема синтеза КМТП обеспечения свойств элементам ГТД.

Следует отметить, что между этими этапами действуют итерационно-рекуррентные связи.

Далее, можно пояснить эти этапы.

На 1-м этапе разрабатывается системная модель синтеза КМТП. Она имеет следующие особенности (рис. 7):

а). Системная модель синтеза КМТП базируется на системном подходе, включает следующие виды связей:

- внешние связи;
- внутренние связи.

б). Внешние связи в системной модели устанавливаются на базе системного подхода, в котором между объектами или этапами макросистемы действуют итерационно-рекуррентные связи.

в). Внутренние связи (петли) устанавливаются:

- особенности действия неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ), которые в соответствии с работой [11] можно представлять действиями 7-ми родов;
- особенности реализации параметров КМТП, которые в соответствии с работой [11] можно представлять 7-ми уровнями связей параметров;

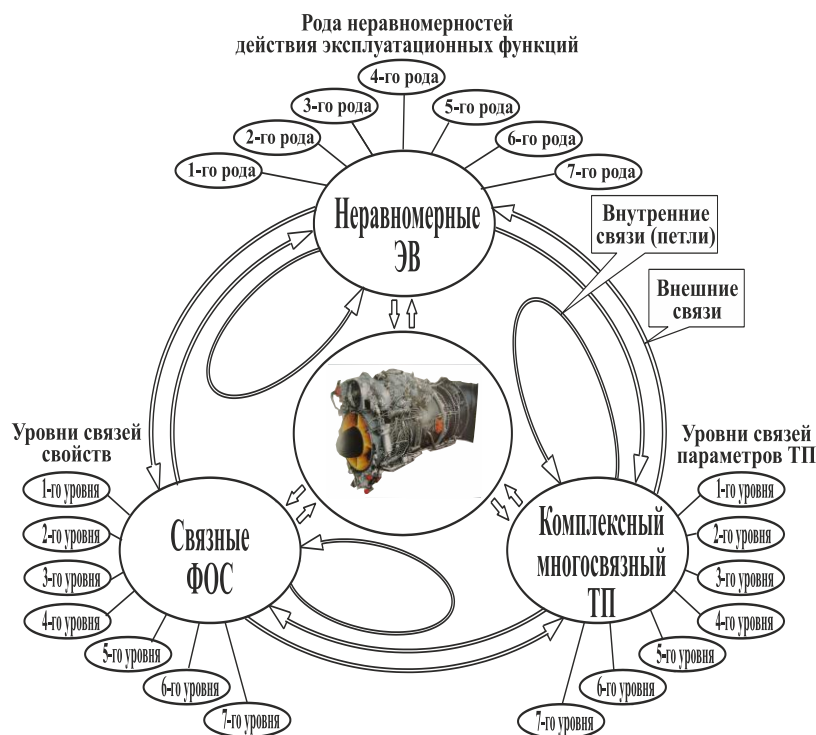


Рисунок 7. Системная модель синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС

работы в условиях действия неравномерностей 7-ми родов. Эта общая схема базируется на принципах обеспечения ФОС для отдельных деталей и специальных свойств для всех структурных элементов системы [2, 11].

Процесс формирования ФОС структурным элементам ГТД представлен на рис. 8. Здесь показана общая схема формирования свойств в ГТД на базе КМТП обеспечения ФОС структурным элементам ГТД. Разработанная схема имеет следующие особенности:

1. Необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации ГТД на его элементы и подсистемы действуют неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к возникновению неравномерностей износа 7-ми родов.
2. Общая схема формирования свойств в ГТД базируется на обеспечении свойств в оболочках двух типов:

[11] можно представлять 7-ми уровнями связей параметров;

- особенности реализации ФОС элементов и подсистем, которые в соответствии с работой [11] можно представлять 7-ми уровнями связей параметров.

На рис. 7 представлена системная модель синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС. На основе этой модели устанавливаются внутренние и внешние связи в системе: эксплуатация, технология, свойства [11].

На 2-м этапе разрабатывается общая схема формирования свойств в ГТД для его

- первая оболочка (внутренняя) выполняет функцию обеспечения ФОС по элементу (детали, группе) ГТД, которая предназначена для компенсации действия неравномерностей низших родов (внутренние связи);

- вторая оболочка выполняет функцию обеспечения заданных свойств между элементами, деталями, группами, подсистемами ГТД (внешние связи), которая предназначена для выравнивания свойств между элементами следующего уровня.

3. Обеспечение свойств элементам структуры ГТД выполняется по 7-ми уровням на базе установленных связей.

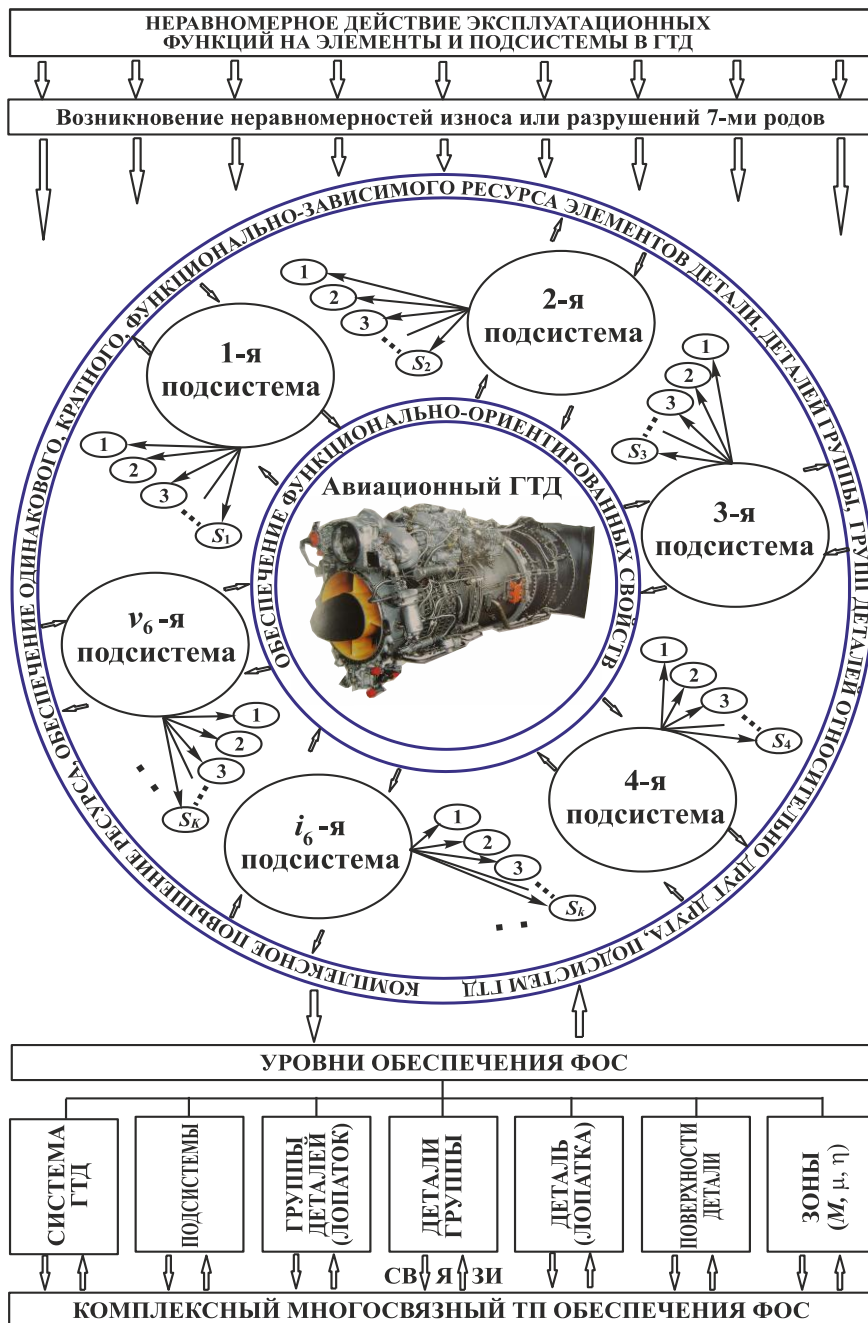


Рисунок 8. Общая схема формирования свойств в ГТД на базе КМТП обеспечения ФОС его структурным элементам

4. Для обеспечения ФОС и заданных свойств структурным составляющим ГТД необходим КМТП.

На 3-м этапе разрабатывается структурная схема синтеза КМТП обеспечения свойств элементам ГТД. В этом случае алгоритм синтеза КМТП выполняется в следующем порядке:

1. Выполняется деление системы ГТД на подсистемы и элементы (рис. 9).

2. Производится их классификация по составляющим элементам 7-ми уровней.

3. Устанавливаются закономерности (связи) особенностей износа и разрушения элементов и подсистем ГТД в процессе эксплуатации, характеризующиеся 7-ю родами.

4. Определяется алгоритм обеспечения ФОС каждого элемента системы ГТД.

5. Устанавливаются связи технологических параметров обеспечения ФОС элементов структуры (7 уровней) в зависимости от особенностей их эксплуатации, выпол-

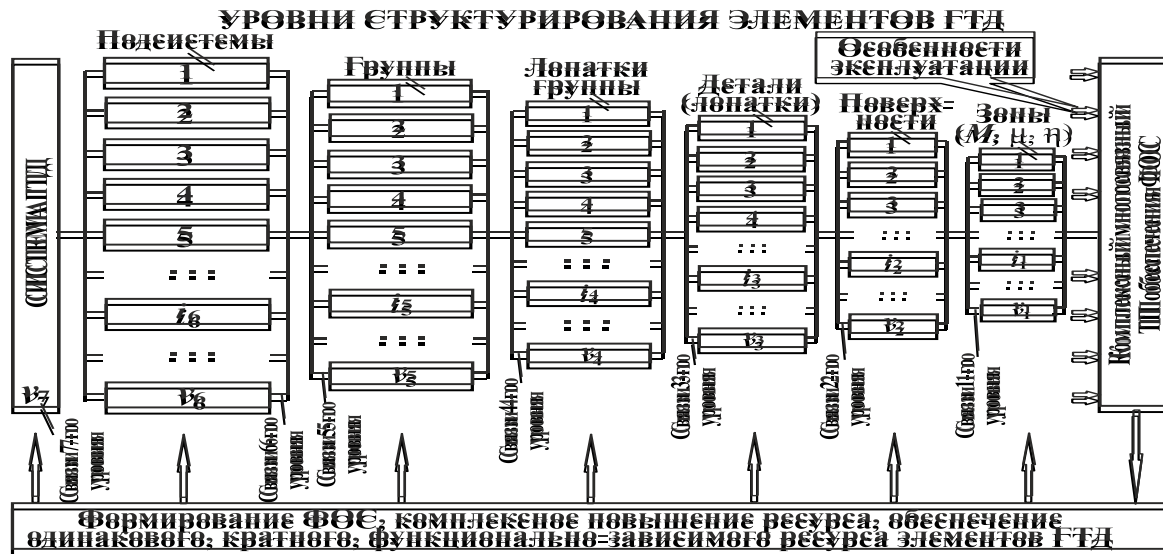


Рисунок 9. Иерархические уровни структурирования элементов ГТД

няемые из условия равенства, кратности или функционально-зависимого ресурса.

6. Структурируется алгоритм КМТП изготовления элементов и подсистем ГТД.

7. Составляется КМТП и разрабатывается необходимое технологическое обеспечение (рис. 10).

На рис. 10 представлена структурная схема синтеза КМТП обеспечения свойств элементам ГТД. Можно отметить, что она базируется на основных принципах технологии машиностроения. А именно здесь, на этом этапе выполняется деление структуры ГТД на составляющие и их классификация (иерархическая структура) (рис. 9).

В этом случае, устанавливаются уровни эксплуатационных связей (рис. 10). Да-

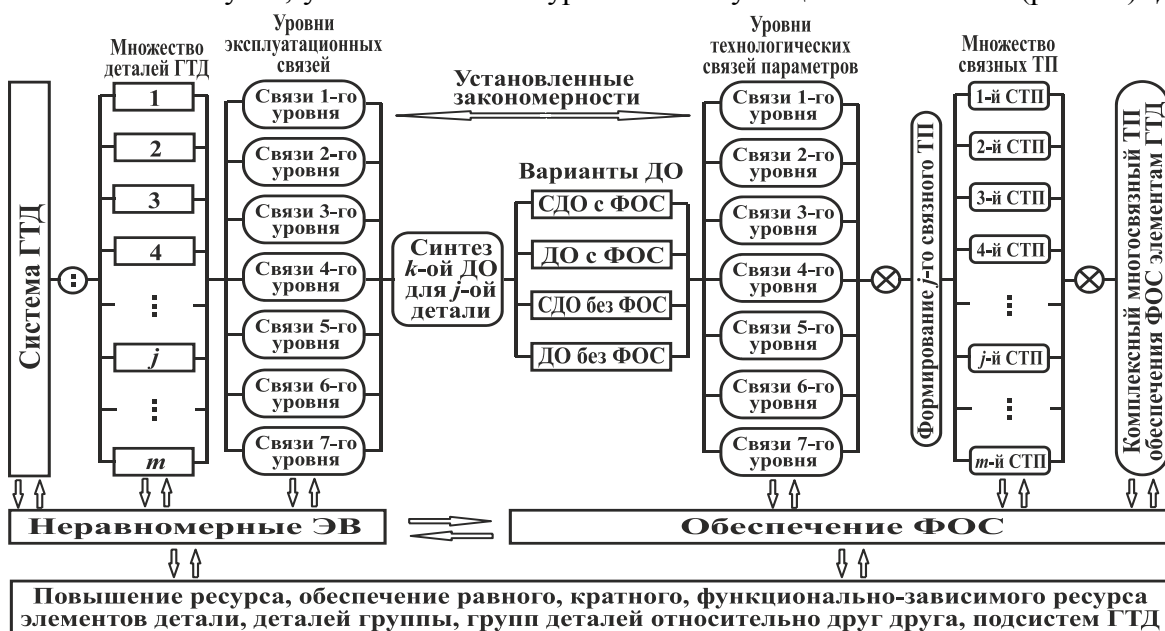


Рисунок 10. Структурная схема синтеза КМТП обеспечения свойств элементам ГТД

лее, выполняется синтез  $k$ -ой детали-операции (ДО) 1-го связного технологического процесса (СТП) для  $j$ -ой детали. Выполняется композиция 1-го СТП. При этом ДО могут быть следующих вариантов:

- связные детали-операции (СДО) с ФОС элементов ГТД;
- ДО с ФОС элементов ГТД;
- СДО без ФОС элементов ГТД;
- ДО без ФОС элементов ГТД.



Рисунок 11. Структура связей в процессе проектирования

Для обеспечения ФОС между структурными составляющими ГТД, на этапе решения инженеринговой задачи, устанавливаются технологические параметры обеспечения свойств элементов, деталей, групп деталей и подсистем ГТД.

Когда определена структура 1-го СТП, формируется структура 2-го СТП, ..., затем  $j$ -ого СТП и так далее, пока не будут сформирован  $m$ -й СТП. На базе этих СТП формируется КМТП обеспечения ФОС структурным элементам ГТД (рис. 10).

Важно также отметить, что процесс проектирования КМТП базируется на многоуровневых связях. На рис. 11 представлена связующая схема КМТП обеспечения ФОС структурным элементам ГТД. При этом приведенными методами можно обеспечивать ФОС для следующих элементов и подсистем ГТД:

1. Зоны детали.
2. Элементы детали.
3. Деталь (например, лопатка);
4. Детали группы (например, группа лопаток).
5. Группы деталей относительно друг друга (например, группа лопаток компрессора относительно группы лопаток турбины).
6. Подсистемы.
7. ГТД.

### 5. Синтез технологического обеспечения комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС

На III-ей стадии проектирования КМТП (рис. 5) выполняется синтез технологического обеспечения. Поэтому на этой стадии разрабатывается необходимое технологическое оборудование, оснастка, инструменты и другое обеспечение.

Можно отметить, что процесс проектирования технологического обеспечения базируется на структуре КМТП. Структура технологического обеспечения изоморфна структуре технологического процесса. Заметим, что это многовариантный процесс, который может включать генерированное множества вариантов структур технологического обеспечения. При этом на генерированном множестве вариантов оборудования определяется рациональный, доминирующий или оптимальный вариант технологического обеспечения КМТП.

В качестве примера, в работах [10, 11] представлена структура КМТП напыления функционально-ориентированного покрытия [12] на лопатку компрессора ГТД. Для реализации этого процесса разработан способ напыления функционально-ориентированного покрытия лопаток ГТД [12], на который получен патент России. Здесь, представлена структурная схема синтеза функционально-ориентированного покрытия лопаток компрессора и лопаток турбины (группы) на базе принципа равенства их ресурса. А также в этих работах показан разработанный алгоритм реализации технологического процесса формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия с пространственным контуром границ каждого слоя.

На основании полученных в этих исследованиях данных обеспечивается возможность реализации следующего:

1. Изготовления комплекта защитных экранов с пространственным контуром границ для реализации разработанного способа формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия пера лопатки компрессора.

2. Изготовление трафаретов для реализации специальных масок и формирования функционально-ориентированного покрытия пера лопатки компрессора.

В работе [11] представлена методика реализации КМТП формирования функционально-ориентированного покрытия групп лопаток на базе принципа равенства ресурса. А также показаны некоторые особенности синтеза технологического обеспечения напыления функционально-ориентированного покрытия и представлены примеры конкретной реализации многоместного приспособления для напыления разработанного покрытия лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя модели ТВ3-117.

Для напыления многослойных функционально-ориентированного покрытия лопаток использовалась специально модернизированная вакуумная установка ННВ 6.6-И1 и целый комплекс технологического оборудования.

#### **6. Обеспечение заданных технико-экономических параметров ГТД**

Далее, реализуется IV-я стадия проектирования в комплексной методологии, а именно выполняется процесс обеспечения заданных технико-экономических параметров ГТД. Можно отметить, что процесс проектирования КМТП обуславливается многовариантной структурой подпроцессов и операций. При этом одни и те же параметры свойств элементной базы ГТД можно обеспечивать различной структурой технологического процесса. Поэтому в процессе проектирования структуры КМТП обеспечения ФОС структурных элементов ГТД необходимо определять рациональную, доминирующую или оптимальную структуру, которая бы позволяла обеспечивать заданные, требуемые или предельные свойства ГТД и высокие технико-экономические показатели авиационного двигателя.

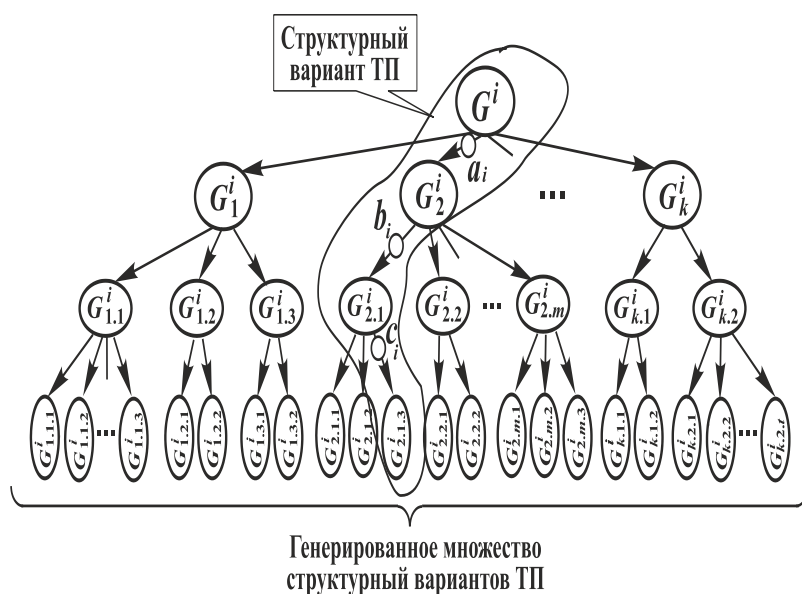
Следует отметить, что в связи многовариантностью структуры КМТП отыскание рациональной, доминирующей или оптимальной структуры является сложным процессом. Поэтому наиболее целесообразно вести процесс синтеза КМТП на базе, например, направленного поиска оптимального или доминирующего варианта технологии [13, 14].

Процесс проектирования рациональной, доминирующей или оптимальной технологии КМТП обеспечения ФОС имеет следующие особенности:

- процесс проектирования выполняется на базе элементов теории графов (рис. 12) [13], при этом реализуется иерархическое дерево-граф вариантов, с помощью которого определяется оптимальное решение;

- процесс проектирования базируется на определении общего критерия технико-экономической эффективности создаваемой технологии и необходимого обеспечения;
- на множестве вариантов возможных методов реализации технологии определяется на каждом иерархическом уровне графа наиболее рациональный метод технологии путем сравнения полных затрат;
- выполняется поэтапный, пошаговый процесс отработки оптимального решения на каждом иерархическом уровне графа; причем на каждом последующем шаге в графе параметры процесса уточняются, число анализируемых вариантов решений сокращается, а точность и сложность расчетов увеличивается;
- процесс проектирования оптимального варианта должен основываться на итерационно-рекуррентных связях, имеющих обратные последовательности процесса;
- синтез оптимального варианта технологии основывается на анализе элементов, подсистем и системы в целом, методе генерирования вариантов схем и направленном поиске наилучших решений без полного перебора всех возможных вариантов для данного структурного элемента ГТД;
- метод позволяет при минимальном числе исходных данных отыскивать необходимую совокупность технически целесообразных вариантов технологии путем направленного отбора КМТП и технологической системы с наилучшими технико-экономическими показателями.

К этим показателям можно отнести следующие параметры технологии:



- максимальную производительность оборудования;
- минимальную технологическую себестоимость ГТД;
- минимальные приведенные затраты производства;
- минимальный срок окупаемости капиталовложений на производство ГТД;
- максимальное сокращение трудоемкости производства ГТД и другие параметры.

Рисунок 12. Граф направленного поиска оптимального варианта технологического обеспечения комплексной многосвязной технологии для ГТД

На рис. 12 представлен граф направленного поиска оптимального варианта техно-

логического обеспечения комплексной многосвязной технологии для ГТД. В соответствии с методикой проектирования графов технологических процессов  $G^i$ , представленной в работе [13], процесс проектирования выполняется пошагово в соответствии с заданными иерархическими уровнями графа. На нижнем уровне иерархии графа (рис. 12) приведено генерированное множество структурных вариантов технологических процессов. С помощью общего критерия технико-экономической эффективности технологии обеспечения ФОС структурным элементам ГТД определяется рациональный



или оптимальный вариант структуры (рис. 12), который определяется выделенными направлениями  $a_i, b_i, c_i$ . При этом данный процесс должен выполняться автоматизировано с помощью разработанных методов и ЭВМ.

Таким образом, направленный поиск оптимального варианта технологии обеспечения ФОС структурных элементов ГТД позволяет существенно сократить длительность проектирования технологического обеспечения технологии и существенно повысить эффективность ее проектирования.

### 7. Заключение

Проведенные в данной работе исследования позволили разработать общую методологию синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структуре деталей ГТД. Она позволяет связать множество технологических процессов изготовления множества структурных элементов (деталей, узлов, подсистем) ГТД и производить управление (технологическое регулирование) свойствами деталей в процессе их изготовления или отделочно-упрочняющей обработки в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций (эксплуатационных воздействий) и возникающих неравномерностей износа и разрушения деталей 7-ми родов. ФОС структурных элементов ГТД в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций обеспечивают качественно новую совокупность свойств авиационного двигателя.

Представленные в работе результаты заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ особенностей применения деталей с ФОС для ГТД. Обеспечение ФОС деталей ГТД обеспечивает качественно новую совокупность свойств авиационному двигателю, повышает уровень ремонтпригодности деталей и их эксплуатационный потенциал ГТД. При этом установлено, что для решения вопросов повышения технико-экономических показателей ГТД достаточно выполнение ФОС только части деталей.

2. Разработана общая методология синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структурных элементов ГТД. Эта методология предусматривает комплексное решение вопросов повышения технико-экономических показателей ГТД по следующим стадиям проектирования:

I-я стадия проектирования - технологический инжиниринг процесса.

II-я стадия проектирования - разработка общего подхода синтеза комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структурным составляющим ГТД.

III-я стадия проектирования - синтез технологического обеспечения создания комплексной многосвязной технологии обеспечения ФОС структурным составляющим ГТД.

IV-я стадия проектирования – обеспечение заданных технико-экономических параметров структурным элементам ГТД.

3. В работе разработано необходимое обеспечение в решении вопросов синтеза КМТП на базе задач технологического инжиниринга, общего подхода синтеза технологии и направленного поиска оптимальных вариантов процессов и технологических систем.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Авиаинформ. Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2020. – Вып. № 2 (191). – 140 с.

2. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

3. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
4. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностр., 2002. – 328 с.
5. 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.
6. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированных покрытий: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 22 с.
7. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Д.А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международ. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4(50). – С. 126 - 131.
8. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий: автореферат дис. ... канд. техн. наук / В. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – 18 с.
9. 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: Международ. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4(50). – С. 132 - 139.
10. 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-технологические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1 (103). – С. 40-48. Режим доступа: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>.
11. 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 междунар. научно-техн. конф. в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 235-253.
12. Пат. 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. – заявл. № 2018107164 от 26.02.2018; опубл. 15.04.2020, Бюл. № 11. – 7 с.
13. 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: Сб. трудов XXVII междунар. научно-техн. конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 311-317.
14. Автоматические линии в машиностроении. Справочник. В 3-х т. Т. 1. Этапы проектирования и расчет / Под ред. Л. И. Волчкевича. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

Поступила в редколлегию 08.01.2021 г.