

УДК 621.431.75

В. А. Михайлов¹, аспирант, **А. П. Пичко**², инж., **А. В. Чугункин**², инж.,
Т. В. Хавлин¹, соискатель, **А. В. Лукичев**¹, канд. техн. наук, доц.,
Д. А. Михайлов¹, канд. техн. наук, **А. Н. Михайлов**¹, д-р техн. наук, проф.

¹ Донецкий национальный технический университет,

² Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске,

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.org

ОБЩИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

В данной работе исследованы основные особенности действия эксплуатационных функций на элементы, узлы и подсистемы газотурбинного двигателя. При этом показано, что параметры их действия являются переменными во времени и в пространстве. Разработаны общие основы повышения ресурса газотурбинного двигателя на основе группы специальных принципов функционально-ориентированных технологий. Приведены гипотетические схемы структуры узлов и подсистем газотурбинного двигателя. В работе представлены основные характеристики общего подхода в повышении ресурса газотурбинного двигателя на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств. Также разработаны универсальные структурные схемы газотурбинных двигателей. Выполненные исследования и разработанные общие основы повышения ресурса газотурбинного двигателя позволяют полностью адаптировать его свойства к особенностям эксплуатации и обеспечивать повышение эксплуатационного потенциала.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, структура, неравномерные разрушения, общий подход, принципы, ресурс, свойства.

**V. A. Mikhaylov, A. P. Pichko, A. V. Chugunkin, T. V. Khavlin,
A. V. Lukichov, D. A. Mikhaylov, A. N. Mikhaylov**

GENERAL BASES AND PRINCIPLES OF INCREASING THE RESOURCE OF GAS TURBINE ENGINES ON THE BASIS OF THE FUNCTIONALLY-ORIENTED APPROACH

In this paper, the main features of the action of operational functions on the elements, nodes and subsystems of a gas turbine engine are investigated. It is shown that the parameters of their action are variable in time and in space. General principles for increasing the resource of a gas turbine engine based on a group of special principles of functionally-oriented technologies are developed. The hypothetical schemes of the structure of the nodes and subsystems of the gas turbine engine are given. The paper presents the main characteristics of a general approach to increasing the life of a gas turbine engine based on the provision of functionally oriented properties. Also, universal structural diagrams of gas turbine engines have been developed. The performed researches and the developed general bases of increase of a resource of the gas-turbine engine allow to completely adapt its properties to features of operation and to provide increase of operational potential.

Keywords: gas turbine engine, structure, uneven fracture, general approach, principles, resource, properties.

1. Введение

В настоящее время в народном хозяйстве широко используются газотурбинные двигатели (ГТД) для обеспечения определенных целевых функций машин и технологических систем различного назначения. ГТД применяются в авиации для самолетов и вертолетов, в судостроении для судовых силовых установок, в нефтегазовой промышленности как технологические системы, в транспортной промышленности для повышения эффективности работы тяжелых и высокоскоростных машин и других отраслях промышленности. Такое широкое использование ГТД обусловлено их высокой эффек-

тивностью и устойчивыми эксплуатационными параметрами работы, в том числе и в тяжелых и высокоскоростных условиях.

Вместе с тем, следует заметить, что ГТД состоит из множества различных элементов, узлов и подсистем, которые имеют различный ресурс работы. При выходе их строя необходимо выполнять их замену или производить ремонтные работы. Это снижает технико-экономические показатели ГТД в целом, не обеспечивает полное использование всех элементов, узлов и подсистем, а также не позволяет повышать их эксплуатационный потенциал. Это обусловлено множеством факторов и прежде всего тем, что на элементы, узлы и подсистемы действуют переменные во времени и в пространстве эксплуатационные функции, а именно эрозионные, коррозионные, термические, химические, физические и другие вредные воздействия [1, 2]. Эти неравномерности приводят к неравномерным и неодинаковым разрушениям технологических поверхностей, элементов [3, 4], узлов и подсистем ГТД, что снижает ресурс работы двигателя в целом и в ряде случаев, невозможности восстановления этих элементов, узлов и подсистем при ремонтных работах.

Целью данной работы является повышение общего ресурса ГТД в условиях действия неравномерного эрозионно-абразивного износа его элементов, узлов и подсистем за счет их увеличения межремонтного ресурса и количества возможных восстановлений на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств (ФОС), реализуемых на базе принципов функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [5].

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить исследования особенностей эксплуатации элементов, узлов и подсистем ГТД, разработать общий подход и основные принципы повышения ресурса ГТД, дать рекомендации по применению общего подхода в повышении ресурса ГТД на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств элементам, узлам и подсистемам.

2. Особенности эксплуатации элементов, узлов и подсистем ГТД

Гипотетически, все схемы ГТД, работающих в сложных эксплуатационных условиях, можно привести к обобщенным вариантам структурных схем, которые представлены на рис. 1. Теоретически, ГТД работает в соответствии с идеальным термодинамическим циклом Брайтона [6]. На практике, ГТД работает по реальному термодинамическому циклу, который отличается от идеального наличием потерь в процессе сжатия, расширения и при подводе теплоты. Кроме того, в действительном цикле сказывается изменение теплоемкости рабочего тела и его состава (воздух, газозоодушная смесь, газозоодушная смесь с пылевыми, абразивными, водяными и другими включениями). При этом в процессе работы ГТД из-за сложных эксплуатационных воздействий среды на его элементы, узлы и подсистемы происходит эрозионное, коррозионное, абразивное, термическое, химическое разрушение поверхностного слоя деталей двигателя. Это приводит к возникновению еще большего отличия реального от идеального термодинамического цикла работы ГТД.

На рис. 1 представлены обобщенные варианты структурных схем ГТД. Здесь, показано: рис. 1, а - для одновального ГТД без свободной турбины; рис. 1, б – для ГТД со свободной турбиной; рис. 1, в – для ГТД со свободной турбиной и компрессорами низкого и высокого давления. При этом стрелками *b* и *c* показаны возможные варианты направлений вывода вала отбора мощности, а именно в заднюю часть двигателя или в переднюю часть. На рис. 1 обозначены следующие элементы: x_1 – входной направляю-

щий аппарат (ВНА), x_2 – компрессор, x_3 – камера сгорания, x_4 – турбина, x_5 – свободная турбина, x_{21} – компрессор низкого давления, x_{22} – компрессор высокого давления, x_{41} – турбина компрессора высокого давления, x_{42} – турбина компрессора низкого давления. Между элементами структуры ГТД действуют связи или отношения: a_{ij} , a_{4122} , a_{4221} – связи между элементами структуры ГТД.

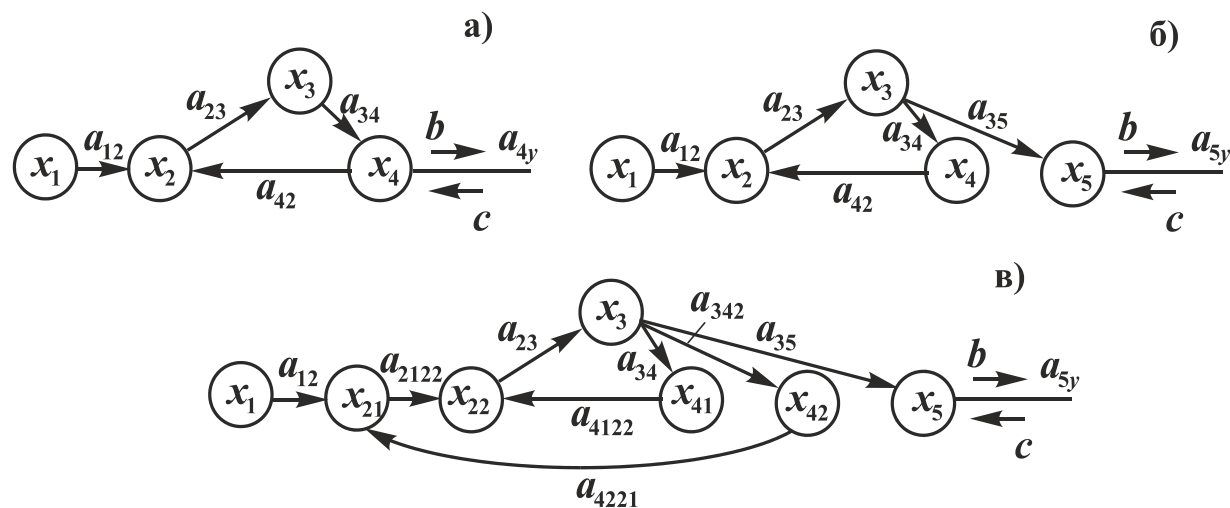


Рисунок 1. Варианты структурных схем ГТД:

а – одновального без свободной турбины; б – со свободной турбиной; в – со свободной турбиной и компрессорами низкого и высокого давления

Анализируя варианты схем рис. 1, структуру ГТД в целом можно описать следующим выражением:

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

где X – множество элементов ГТД;

A – множество отношений между элементами ГТД.

Здесь: $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ – множество элементов системы для структуры рис. 1, а;

$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ – множество элементов системы для структуры рис. 1, б;

$X = \{x_1, x_{21}, x_{22}, x_3, x_{41}, x_{42}, x_5\}$ – множество элементов системы для структуры рис. 1, в.

При этом связи можно представить следующими множествами:

$A = \{a_{12}, a_{23}, a_{34}, a_{42}, a_{4y}\}$ – множество отношений для структуры рис. 1, а;

$A = \{a_{12}, a_{23}, a_{34}, a_{42}, a_{35}, a_{5y}\}$ – множество отношений для структуры рис. 1, б;

$A = \{a_{12}, a_{2122}, a_{23}, a_{34}, a_{4122}, a_{342}, a_{4221}, a_{35}, a_{5y}\}$ – множество отношений для структуры рис. 1, в.

Выполненные исследования особенностей работы ГТД показывает, что структурные элементы разрушаются (изнашиваются) в процессе эксплуатации неравномерно. Это обусловлено особенностями эксплуатации ГТД и различным характером разрушений структурных элементов. Они связаны с различным характером эксплуатационных воздействий. Например, во ВНА x_1 и компрессоре x_2 (рис. 1, а) преобладают

эрозионно-абразивные воздействия, в камере сгорания x_3 преобладают термические, химические, физические и абразивные процессы и так далее. Поэтому в процессе обеспечения свойств эти особенности необходимо учитывать и обеспечивать свойства структурным элементам ГТД в соответствии с их особенностями эксплуатации. Это возможно обеспечивать на основе обеспечения ФОС посредством применения ФОТ.

Неравномерность действия эксплуатационных воздействий происходит и в подсистемах структурных элементов ГТД. Например, в компрессоре x_2 ГТД серии ТВ3-117, представленного структурной схемой рис. 1, б, имеется пять групп ступеней лопаток, в каждой из которых имеется своя неравномерность износа лопаток (неравномерность 2-го рода) и неравномерность износа по группам ступеней (неравномерность 3-го рода) [4].

На рис. 2 представлена гипотетическая схема структуры лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117. Здесь имеется пять групп лопаток, а именно: поворотные лопатки ВНА, поворотные лопатки НА, лопатки НА (статор), лопатки СА, рабочие лопатки ротора.



Рисунок 2. Гипотетическая схема структуры лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117

ки ВНА, поворотные лопатки НА, лопатки НА (статор), лопатки СА, рабочие лопатки ротора. Здесь v_{ij} – обозначает количество лопаток в i – ой группы ступеней j – ой заданной ступени.

Можно отметить, что по функциональным элементам лопатки также действуют неравномерные эрозионно-абразивные воздействия. При этом они разрушаются неравномерно. Эти неравномерности можно отнести к неравномерностям 1-го рода [4]. На рис. 3 приведен общий вид рабочей лопатки ротора. Здесь, разрушения пера лопатки начинается с верхней части входной кромки 1 и распространяется к выходной кромке 2 по поверхности корыта пера 3. Последовательные разрушения пера лопатки показаны на рис. 3 пунктирными линиями 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 и 5-5.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить следующее:

1. ГТД имеет сложную структуру и состоит из множества элементов (лопаток), узлов и подсистем. Эти элементы структурированы в ступени лопаток, группы ступеней и подсистемы.

2. В процессе эксплуатации ГТД на структурные элементы, в каждой группе лопаток, между группами ступеней лопаток, между узлами и ступенями действуют изменяющиеся по этим элементам эксплуатационные воздействия (эрозионные, коррозионные, химические, физические, механические и комбинированные воздействия). Неравномерность действия эксплуатационных воздействий на структурные элементы ГТД можно оценивать неравномерностями различных родов. Например, в компрессоре ГТД

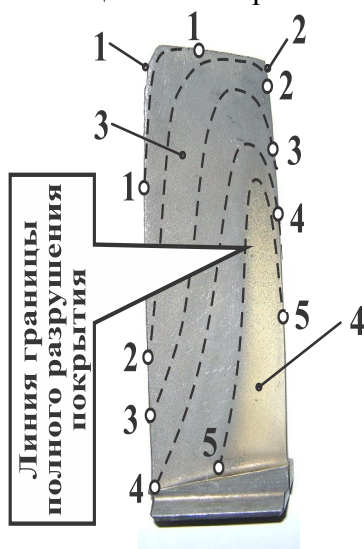


Рисунок 3. Схема неравномерного эрозионного разрушения (неравномерность 1-го рода) пера лопатки компрессора ГТД

модели ТВ3-117 действуют неравномерности 3-х родов [4], вызванные эрозионно-абразивным износом. В целом на элементы, узлы и подсистемы ГТД действует определенная структура эксплуатационных функций.

3. Существующие традиционные методы повышения ресурса ГТД обеспечивают дальнейшее повышение его ресурса в условиях действия неравномерностей эксплуатационных воздействий. Однако эти методы не позволят значительно повышать ресурс ГТД так как здесь, имеются определенные ограничения. При этом невозможно обеспечить повышение полного эксплуатационного потенциала ГТД и адаптации его к особенностям эксплуатации.

4. Для повышения ресурса ГТД, работающего в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций и соответственно неравномерных разрушений элементов, узлов и подсистем, необходимо обеспечивать специальные неравномерные их свойства, причем в соответствии с действием эксплуатационных функций. Это возможно выполнять на основе применения функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [5].

5. Обеспечение ФОС на базе ФОТ позволяет исключить влияние неравномерного действия эксплуатационных функций и повысить ресурс ГТД. При этом применяя функционально-ориентированные покрытия [3] обеспечивается возможность повышения общего ресурса ГТД за счет увеличения межремонтного ресурса элементов и количества их восстановлений в процессе эксплуатации.

6. Главным в применении ФОТ для повышения ресурса ГТД является то, что создаются условия для повышения полного эксплуатационного потенциала ГТД и адаптации его элементов, узлов и подсистем к особенностям эксплуатации.

3. Общий подход и основные принципы повышения ресурса ГТД

Выполненные исследования особенностей эксплуатации ГТД показывают, что структурные элементы двигателя разрушаются неравномерно, при этом действуют неравномерности нескольких родов [4]. Это обусловлено тем, что структура ГТД состоит из групп элементов (лопаток), которые составляют другие группы (ступени), входящие в свою очередь в следующие группы подсистем (турбокомпрессор, газогенератор, свободная турбина и тому подобное). Поэтому из-за сложной, и по сути дела, многомерной

структуры элементов ГТД возникают многомерные неравномерные разрушения лопаток нескольких родов [4]. Эти неравномерности разрушений лопаток не позволяют традиционными методами обеспечивать заданные их свойства и вести повышение ресурса ГТД в целом.

В условиях действия неравномерных многомерных разрушений элементов ГТД целесообразно обеспечивать для них ФОС на базе ФОТ [5]. Эти технологии обеспечивают реализацию следующих вариантов свойств:

1. ФОС в соответствии с группой особых принципов ФОТ [5].
2. ФОС изменяющиеся в пространстве (например, поверхности или объема детали) функционального элемента (лопатки), функциональных элементов ступени и группы ступеней лопаток. Изменяющиеся свойства могут выполняться за счет изменяющихся физико-механических свойств, за счет изменяющейся толщины покрытия и других параметров [5].
3. ФОС изменяющиеся во времени по функциональному элементу, функциональным элементам ступени и группам ступеней лопаток. Эти свойства можно реализовывать за счет специальных, градиентных, модульных, функционально-ориентированных покрытий [5].
4. ФОС изменяющиеся в зависимости от особенностей эксплуатации структурных элементов, узлов, групп и подсистем ГТД [5].
5. ФОС в соответствии с другими особенностями эксплуатации ГТД [5].

ФОС структурных элементов ГТД позволяет в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий реализовывать следующие особенности:

- равномерное разрушение всех структурных элементов ГТД (например, поверхностей, поверхностных слоев, объемных элементов, геометрических размеров и формы), что позволяет решать вопросы регулировки, восстановления и повышения их ресурса в ГТД;
- обеспечивается возможность полного одновременного исчерпания ресурса каждого элемента ГТД по всему комплексу параметров разрушений, например, эрозионному износу, пределу выносливости по изгибным, растягивающим, касательным и другим напряжениям; это позволяет выработать весь потенциал ресурса всех деталей ГТД до их полного разрушения по всем видам разрушений, что в целом повышает технико-экономические параметры эксплуатации ГТД;
- обеспечивается возможность реализации кратного ресурса по одним видам разрушений элементов ГТД (например, по эрозионному износу) относительно других видов разрушений (например, по выносливости); это позволяет вести работы по многократному восстановлению ресурса элементов ГТД сначала в зависимости от одного вида разрушений, потом по другому виду разрушений и так далее, и в целом повысить общий потенциал ресурса ГТД;
- одновременное полное разрушение покрытий, наносимых на структурные элементы ГТД при не разрушении (износе) основного материала, например, тела пера лопатки; это позволяет увеличить число возможных восстановлений элементов ГТД и упростить процесс восстановления лопаток;
- одновременное полное разрушение сразу всех структурных элементов ГТД, что обеспечивает полную выработку ресурса всех структурных элементов ГТД в целом и повышение технико-экономических параметров эксплуатации авиационных двигателей;
- обеспечивать кратный ресурс одних элементов относительно других структурных элементов ГТД и другие особенности; это обеспечивает возможность в повышении

общего эксплуатационного потенциала ГТД за счет рационального или оптимального использования запасных частей.

Все это позволяет повысить общий ресурс ГТД за счет увеличения его межремонтного ресурса и количества восстановлений его структурных элементов. При этом обеспечение ФОС на базе ФОТ обеспечивает дополнительно следующее:

1. Обеспечивается возможность в повышении ресурса ГТД за счет комплексного увеличения его межремонтного ресурса и количества восстановлений элементной базы.
2. Повышается общий эксплуатационный потенциал всех структурных элементов ГТД.
3. Создаются условия к реализации полной адаптации структурных элементов ГТД при изготовлении к особенностям их эксплуатации в двигателе.
4. Обеспечивается возможность реализации заданного ресурса элементов, подсистем и всего ГТД в целом.
5. Обеспечивается возможность управления свойствами элементов ГТД при их изготовлении для обеспечения требуемых свойств двигателя в условиях эксплуатации, что в ряде случаев диктуется конъюнктурой рынка или производителя ГТД.
6. Обеспечивается качественно новая совокупность свойств ГТД.

На рис. 4. представлена гипотетическая схема общего подхода в обеспечении ФОС ГТД с взаимосвязями φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C .

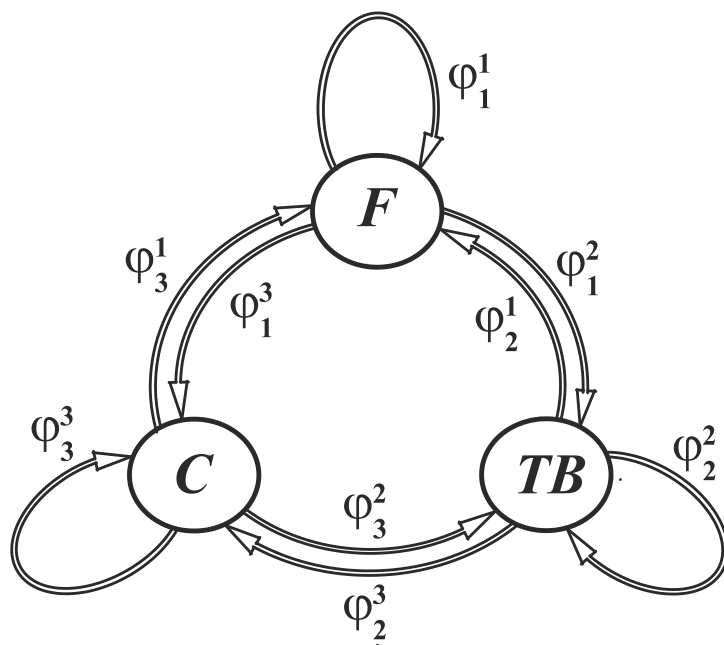


Рисунок 4. Гипотетическая схема общего подхода в обеспечении ФОС ГТД с взаимосвязями φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C

На базе этих связей реализуются функционально-ориентированные свойства [5]. Здесь можно отметить, что структура связей между элементами модели имеет замкнутую форму, которая позволяет определять параметры технологических воздействий и свойств детали в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на элементы детали. Петли модели φ_i^i обозначают внутренние процессы в i -м объекте системы. Все эти параметры определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий [5]:

1. Функционального соответствия особенностей действия эксплуатационных функций, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств.
2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, гео-

метрическим параметрам зоны реализации технологических воздействий на деталь и геометрических параметров зонного 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 детали.

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента детали.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе детали.

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

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

В общем подходе функционально-ориентированные свойства элементов ГТД формируются на базе этой группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств деталей в зависимости от особенности их эксплуатации в авиационном двигателе.

На рис. 5 представлены основные характеристики общего подхода в повышении ресурса ГТД на основе обеспечения ФОС. Здесь показано, что основные характеристики применения общего подхода в обеспечении ФОС структурируются на следующих параметрах:

- условия применения,
- основные признаки применения ФОС,
- основные варианты реализации ФОС,
- особенности применения.

Можно отметить, что целесообразно применять общий подход необходимо в следующих случаях:

- наличие неравномерного действия эксплуатационных функций по деталям, узлам и подсистемам ГТД (неравномерности трех родов);
- наличие неодинакового ресурса деталей, узлов и подсистем при эксплуатации ГТД;
- возможность многократного восстановления работоспособности деталей, узлов и подсистем на базе ФОС;

Следует заметить, что применение ФОС определяется следующими признаками [5]:

- применение функционально-ориентированных технологий (ФОТ);
- технологические воздействия и свойства реализуются на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств [4].

- технологические воздействия и свойства реализуются в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций.

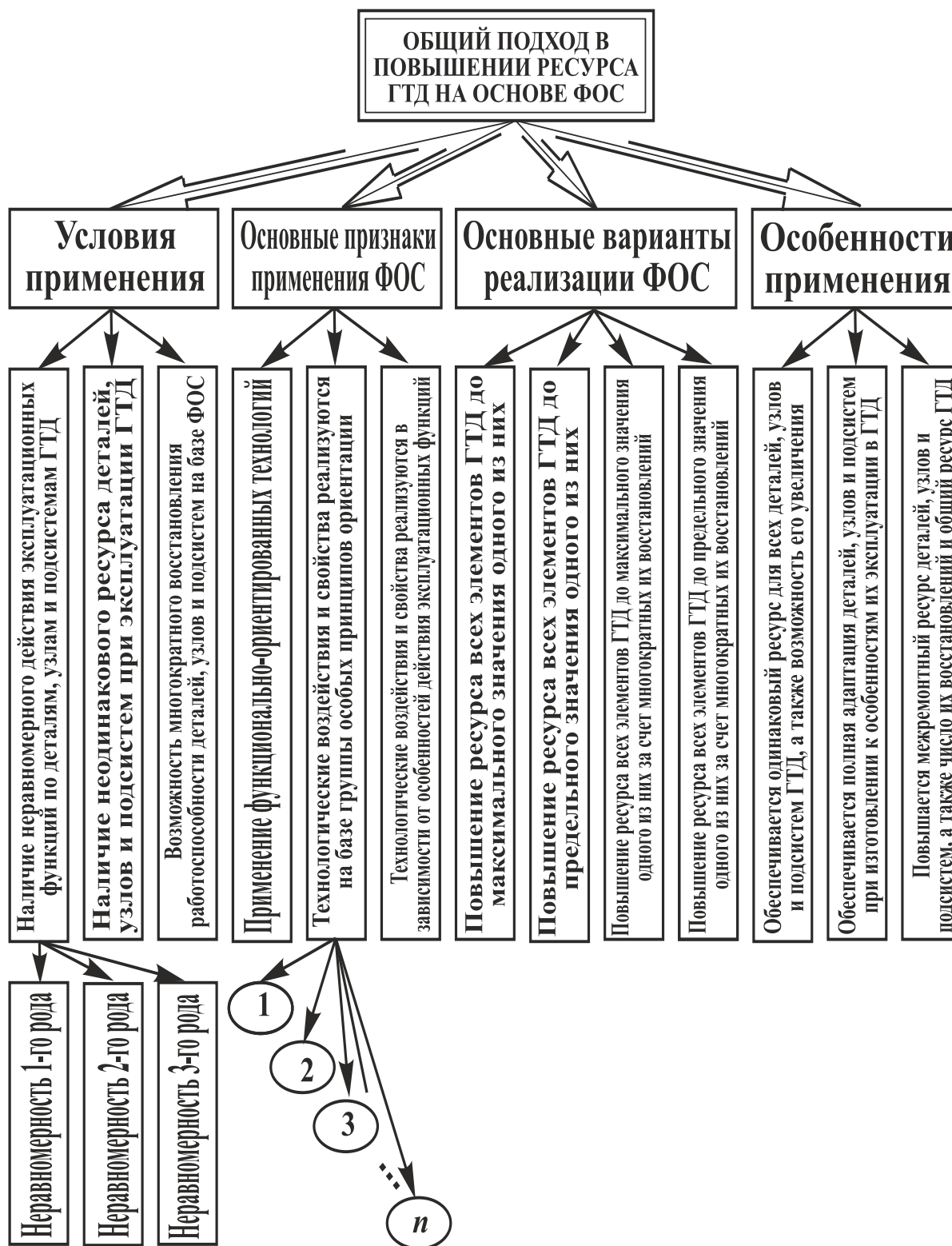


Рисунок 5. Основные характеристики общего подхода в повышении ресурса ГТД на основе обеспечения ФОС

Функционально-ориентированный подход [5] базируется на применении группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств изделий. Поэтому этот процесс многовариантен и имеет свои особенности применения.

4. Анализ эксплуатационные особенности ГТД с ФОС элементной базы

Разработанный общий подход в повышении ресурса ГТД на базе функционально-ориентированного подхода позволяет обеспечивать для авиационных двигателей выполнение следующего:

1. Повышение общего ресурса ГТД, за счет увеличения межремонтного ресурса и количества восстановлений деталей.
2. Обеспечение выполнения реализации полного, ограниченного или заданного эксплуатационного потенциала всех элементов ГТД или всего ГТД в целом.
3. Обеспечивается возможность управления ресурсом работы ГТД в зависимости от условий заказчика.

В случае восстановления работоспособности любой детали при ремонте ГТД технологическими методами можно отметить следующее. Для любой i – ой детали ГТД с ФОС полный эксплуатационный потенциал по ресурсу, в случае многократного ее восстановления по разрушениям различного характера, определяется по следующей зависимости:

$$R_0^i = \sum_{k_m=1}^{S_m} \cdots \sum_{k_2=1}^{S_2} \sum_{k_1=1}^{S_1} R_{k_1 k_2 \cdots k_m}^i ; \quad (1)$$

где R_0^i - полный эксплуатационный потенциал по ресурсу для i – ой детали ГТД с ФОС;

$R_{k_1 k_2 \cdots k_m}^i$ - ресурс i – ой детали по k_s – му виду разрушений;

S_1, S_2, \dots, S_m - количества восстановлений i – ой детали ГТД по 1-му, 2-му, ..., m -му виду разрушений (например, по износу, по выносливости по изгибным напряжениям и тому подобному);

m – общее количество видов разрушений детали.

Следует отметить, что в процессе эксплуатации i – ой детали ГТД необходимо предусматривать выполнение многократных восстановлений детали с количеством S_1 по 1-му виду разрушений, имеющему самый короткий ресурс (например, по эрозионному разрушению), затем выполнение многократных восстановлений детали с количеством S_2 по 2-му виду разрушений, имеющему более длинный ресурс, чем в предыдущем случае (например, по выносливости по изгибным напряжениям), и так далее, пока не будет полностью исчерпан полный ресурс детали. Далее, данная деталь, уже не восстанавливаемая ни по каким либо видам разрушений, и ее можно только утилизировать.

Для системы, состоящей из n деталей с ФОС, можно записать условие выработки полного эксплуатационного потенциала по ресурсу для всех деталей ГТД, разрушаемых одновременно в целом:

$$R_0^1 = R_0^2 = \cdots = R_0^i = \cdots = R_0^n ; \quad (2)$$

n – количество деталей ГТД.

Для выражений (1) и (2), решаемых совместно, можно записать следующие условия эксплуатации деталей ГТД:

- если $R_0^i \Rightarrow \max$ - обеспечивается предельный эксплуатационный потенциал ГТД;
- если $R_0^i = X$ - обеспечивается заданный ресурс ГТД, X – назначенный ресурс, который меньше, чем максимальный;
- если $R_0^i = \frac{X}{p}$ - обеспечивается кратный к заданному ресурсу ГТД, p – коэффициент кратности ресурса ГТД.

При восстановлении работоспособности любой i – ой детали ГТД путем установки в двигатель запасных частей с ФОС с номенклатурой T_i деталей можно записать следующее выражение:

$$\sum_{t_1=1}^{T_1} R_0^{1t_1} = \sum_{t_2=2}^{T_2} R_0^{2t_2} = \dots = \sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} = \dots = \sum_{t_n=1}^{T_n} R_0^{nt_i} ; \quad (3)$$

где $R_0^{it_i}$ - ресурс t_i – ой запасной детали с ФОС в i – ой номенклатуре запасных деталей; T_i – общее количество запасных деталей в i – ой номенклатуре запасных деталей;

Для выражения (3) можно записать следующие условия эксплуатации деталей ГТД при использовании запасных частей:

- если $\sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} \Rightarrow \max$ - обеспечивается предельный эксплуатационный потенциал ГТД при использовании запасных частей;
- если $\sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} = Y$ - обеспечивается заданный ресурс ГТД при использовании запасных частей, Y – назначенный ресурс, который меньше, чем максимальный;
- если $\sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} = \frac{Y}{b}$ - обеспечивается кратный к заданному ресурсу ГТД при использовании запасных частей, b – коэффициент кратности ресурса ГТД при восстановлении работоспособности посредством запасных деталей.

Выполненный анализ работоспособности ГТД с ФОС элементной базы показывает [3], что ФОС деталей обеспечивают повышение общего ресурса ГТД, увеличение его межремонтного ресурса и количества возможных восстановлений. При этом применение многократных восстановлений работоспособности ГТД за счет установки в двигатель запасных частей с ФОС позволяет существенно повышать ресурс ГТД. Все это обеспечивает следующее:

- значительное увеличение общего ресурса ГТД;
- полную адаптацию свойств деталей, узлов и подсистем при изготовлении к особенностям их эксплуатации в ГТД;
- выполнение заданного или предельного эксплуатационного потенциала ГТД, в соответствии с условиями заказчика или конъюнктурой рынка.

5. Заключение

Таким образом, выполненные исследования и предлагаемый общий подход позволяет решать вопросы повышения общего ресурса ГТД в условиях действия неравномерного эрозионно-абразивного износа его элементов, узлов и подсистем за счет увеличения межремонтного ресурса и количества возможных восстановлений на основе обеспечения ФОС, реализуемых на базе принципов ФОТ [5].

В данной работе выполнены исследования особенностей эксплуатации элементов, узлов и подсистем ГТД, при этом установлено, что детали авиационных двигателей эксплуатируются в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций. На базе этих исследований разработан общий подход и принципы повышения ресурса ГТД за счет обеспечения деталей и узлам двигателя ФОС. Такой подход позволяет увеличивать межремонтный ресурс ГТД и количество восстановлений его элементов при ремонтах. В работе выполнен анализ и даны рекомендации по применению общего подхода в повышении ресурса ГТД на основе обеспечения ФОС элементам, узлам и подсистемам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богуслаев, В.А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич». - 2005. – 559 с.
2. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения». - 2016. - Вып. - № 6 (147). – 180 с.
3. Михайлов, Д.А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированных покрытий. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Донецк. - 2016. – 22 с.
4. Михайлов, В.А., Байков, А.В., Михайлов, А.Н., Пичко, А.П. Общий подход комплексного повышения ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе обеспечения функционально-ориентированных свойств // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - 2017. – Вып. 1 (56). - С. 101-114.
5. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ. - 2009. – 346 с.
6. Григорьев, В.А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др. – М.: Машиностроение. - 2007. – 491 с.

Поступила в редколлегию 07.06.2017 г.