

УДК 621.433: 629.735.45

А. П. Пичко¹, соискатель, В. А. Михайлов¹, асп., А. А. Колодяжный², соискатель, Д. А. Михайлов², канд. техн. наук, ст. преп., Е. А. Шейко¹, канд. техн. наук, доц., Т. В. Хавлин³, соискатель, А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, проф.

¹ ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР

² ГОУВПО «Академия гражданской защиты», ДНР

³ Донецкая академия внутренних дел МВД ДНР

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статье приведены данные по определению структурной надежности газотурбинных установок для нефтегазовой промышленности. Представлены варианты структурных схем газотурбинной установки. Приведены общие структурно-логические формулы надежности газотурбинных установок. В работе показаны особенности обеспечения свойств подсистем газотурбинной установки из условия обеспечения равной структурной надежности ее подсистем. А также даны рекомендации по повышению структурной надежности газотурбинной установки.

Ключевые слова: газотурбинная установка, структура, структурная надежность, свойства.

A. P. Pichko, V. A. Mikhaylov, A. A. Kolodyazhniy, D. A. Mikhaylov, E. A. Sheyko, T. V. Khavlin, A. N. Mikhaylov

TO THE DETERMINATION OF THE STRUCTURAL RELIABILITY OF GAS TURBINE INSTALLATIONS OF OIL AND GAS INDUSTRY

The article presents data on the determination of the structural reliability of gas turbine installations for the oil and gas industry. The variants of the structural diagrams of the gas turbine plant are presented. General structural and logical formulas for the reliability of gas turbine installations are given. The paper shows the features of ensuring the properties of subsystems of a gas turbine plant from the condition of ensuring equal structural reliability of its subsystems. And also recommendations are given to improve the structural reliability of the gas turbine plant.

Keywords: gas turbine installation, structure, structural reliability, properties.

1. Введение

В нефтегазовой промышленности широко используются газотурбинные установки (ГТУ) для выполнения различных технологических задач. В настоящее время они применяются в производстве электроэнергии совместно с газовой и паровой турбинами и совместном производстве тепла и электроэнергии, а также для обеспечения работы различного технологического оборудования компрессорных и насосных станций [1] (рис. 1). В ряде случаев, для обеспечения работы технологического оборудования насосных и компрессорных станций применяют авиационные [2], в том числе турбовальные [3], газотурбинные двигатели. При этом для рационального использования добываемых ресурсов, для ГТУ могут использоваться попутные нефтяные газы [4]. Это позволяет одновременно обеспечивать решение вопросов обеспечения энергетических проблем технологического оборудования и утилизации вредных выбросов газов.

Можно отметить, что в целом ГТУ состоит из множества функциональных элементов, в том числе лопаток, предназначенных для выполнения эксплуатационных функций. При этом в ГТУ, в различных подсистемах, например, компрессоре или в



Рисунок 1. Общий вид газотурбинной установки SGT 300 Tempest 7.9 МВт



Рисунок 2. Элементы газотурбинной установки SGT 300 Tempest

зоне турбин, действуют различные эксплуатационные функции. К этим функциям можно отнести следующие: абразивно-эрозионные, коррозионные, температурные, химические и другие. Различные воздействия в подсистемах ГТУ приводят к возникновению в различных подсистемах своих особенностей разрушения лопаток. Например, в компрессоре преобладает абразивно-эрозионный износ лопаток, турбинные лопатки испытывают химико-термические и абразивно-эрозионные разрушения, в камере сгорания действует другой комплекс эксплуатационных разрушений. Таким образом, в ГТУ по подсистемам реализуется своя интенсивность воздействий и действует определенная структура воздействий и разрушений.

Кроме того, наряду с неравномерностями действия эксплуатационных воздействий и разрушений по подсистемам ГТУ, происходит неравномерное воздействие и разрушение элементов каждой лопатки. Неравномерность действия эксплуатационных функций по элементам лопатки обусловлено пространственной формой пера лопатки,

его пространственным расположением, кинематикой движения лопатки, особенностями движения газоздушного потока по тракту ГТУ, температурными воздействиями и наличием в потоке различных веществ, абразива, солей, кислот и тому подобного.

Таким образом, ГТУ представляет собой сложную систему, которая структурирована по подсистемам, а именно: компрессор, камера сгорания, турбина компрессора, свободная турбина, турбокомпрессор, газогенератор. Представленная сложность структуры ГТУ и сложность действия эксплуатационных функций по подсистемам ГТУ приводит к неравномерному разрушению лопаток по подсистемам ГТУ. Это приводит к снижению структурной надежности ГТУ и его ресурса.

Целью данной работы является повышение структурной надежности ГТУ за счет обеспечения функционально-ориентированных свойств ее подсистем путем реализации равного их ресурса в условиях действия неодинаковых эксплуатационных функций.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить анализ особенностей работы ГТУ в нефтегазовой промышленности; разработать структурные варианты ГТУ; разработать методы повышения структурной надежности ГТУ.

2. Анализ структуры ГТУ и особенностей их работы в нефтегазовой промышленности

В целом, ГТУ представляет собой двигатель внутреннего сгорания (рис. 2), работающий в соответствии с идеальным термодинамическим циклом Брайтона [3]. На практике, этот идеальный термодинамический цикл, конечно, отличается от реального термодинамического цикла работы ГТУ. Конструкция ГТУ состоит из трех основных частей (рис. 3):

- компрессора a_1 ,
- камеры сгорания a_2 ,
- турбины компрессора a_3 .

При запуске ГТУ воздух всасывается в компрессор через воздухозаборник с помощью системы пуска и передается в камеру сгорания, где он смешивается с топливом. Затем, после зажигания смеси высоковольтной искрой, происходит быстрый рост температуры в камере сгорания, что обеспечивает значительное увеличение объема и скорости газоздушного потока в тракте установки. За счет турбины компрессора выполняется вращение ротора компрессора, который создает необходимое давление в камере сгорания, в зоне турбины компрессора и в зоне рабочей (свободной) турбины, с помощью которой реализуется крутящий момент на ведущем валу ГТУ. Газоздушная смесь, в зоне турбин, расширяется, отбирается из нее тепло и передается в устройство выхлопа.

Отбор мощности в ГТУ выполняется по трем схемам (рис. 3):

- с выходным валом назад (рис. 3, а);
- с выходным валом вперед (рис. 3, б);
- со свободной турбиной (рис. 3, в).

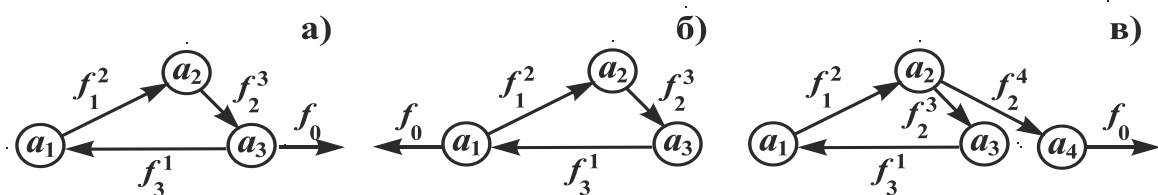


Рисунок 3. Структурные схемы ГТУ: а – с выходным валом назад, б – с выходным валом вперед, в – со свободной турбиной

Между элементами структуры (рис. 3) действуют связи f_i^j . В целом структуру ГТУ можно представить следующим выражением:

$$Str_{ГТУ} = \{A, F\}, \tag{1}$$

где $Str_{ГТУ}$ – структура ГТУ;

A – множество подсистем структуры ГТУ;

F – множество связей между подсистемами ГТУ.

В выражении (1) множества состоят из следующих подмножеств:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\};$$

$$F = \{f_1^2, f_2^3, f_3^1, \dots\},$$

где a_i – любой i -й структурный элемент множества A ;
 f_i^j – связь между подсистемами структуры, а именно a_i -й подсистемы действующей на a_j -ю подсистему.

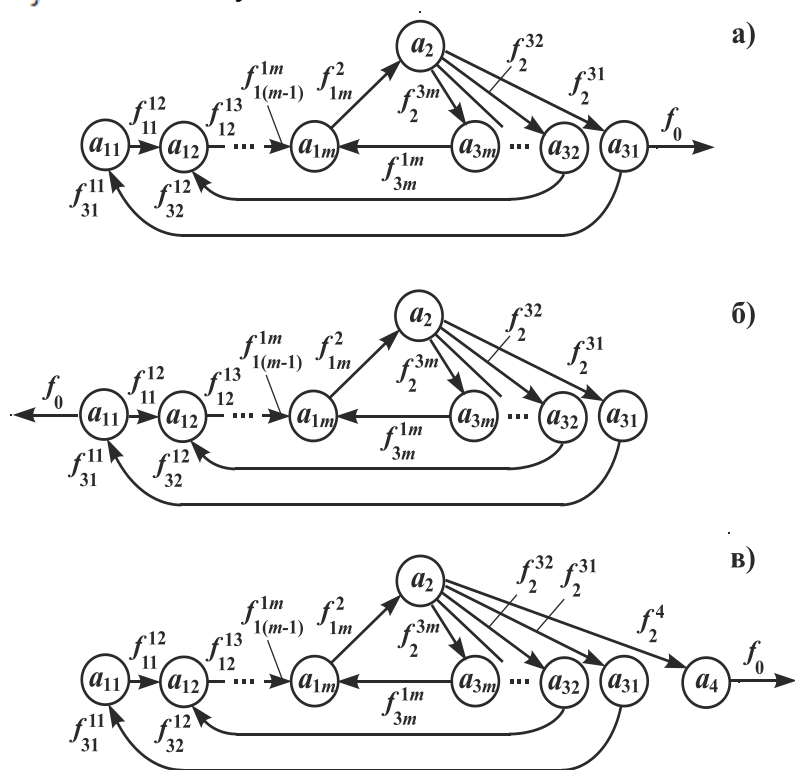


Рисунок 4. Варианты структурных схем многокаскадных ГТУ: а – с выходным валом назад, б – с выходным валом вперед, в – со свободной турбиной

На рис. 3 представлены однокаскадные ГТУ, при этом на практике используются и двухкаскадные ГТУ. В этом случае, турбокомпрессор выполняется в виде двух каскадов лопаток турбины и компрессора. На рис. 4 представлены возможные варианты структурных схем многокаскадных ГТУ. Здесь показано: на рис. 4, а – с выходным валом назад, на рис. 4, б – с выходным валом вперед, на рис. 4, в – со свободной турбиной.

Можно отметить, что многокаскадные компрессоры обеспечивают степень сжатия более, чем 30:1. Компрессоры в ГТУ могут быть

двух типов, центробежные и/или осевые. Обычно, центробежные компрессоры применяются для небольших ГТУ для обеспечения их компактности и жесткости. Они создают степень сжатия до 10:1 на одной ступени (для одного каскада). Центробежные компрессоры ГТУ дешевле и проще в изготовлении, у них более простая балансировка ротора, а также они обеспечивают возможность создания высоких частот вращения ротора (до 100000 об/мин). Осевые компрессоры способны обеспечивать степень сжатия 30:1 и более. При этом повышение рабочих характеристик компрессоров приводит к усложнению управления воздушным потоком, причем с увеличением степени сжатия повышается вероятность срыва потока и помпажа. Для исключения этих явлений дополнительно вводятся специальные устройства для управления потоком воздуха по тракту ГТУ и для обеспечения его устойчивой работы. Особенно это необходимо во время пуска ГТУ и ее работы на нештатных режимах.

При этом выходные валы отбора мощности в ГТУ могут монтироваться назад (рис. 4, а) и вперед (рис. 4, б). Структурный вариант ГТУ со свободной турбиной (рис. 4, в) применяется в тех случаях, когда ГТУ имеют большой пусковой момент, динамические нагрузки и другие сложные параметры эксплуатации.

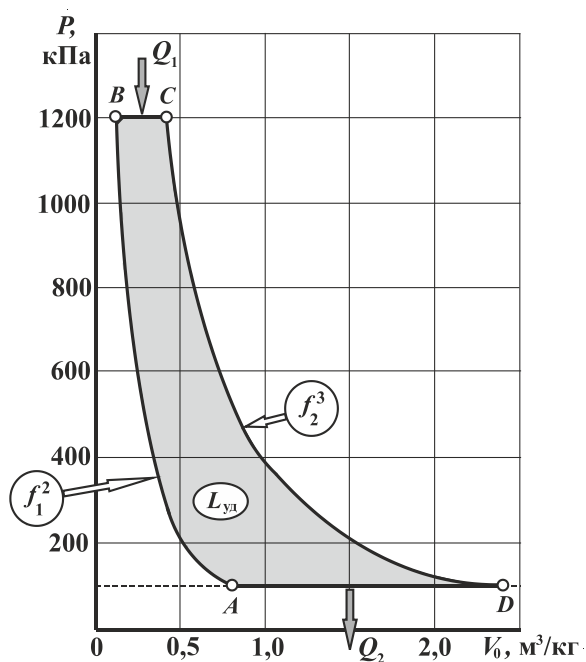


Рисунок 5. Диаграмма идеального цикла Брайтона для ГТУ

В целом газогенератор обеспечивает работу ГТУ в соответствии с идеальным термодинамическим циклом Брайтона (рис. 5).

На рис. 5 показана диаграмма идеального цикла Брайтона [5, 6]. Здесь, приведены данные для степени повышения давления $\pi_{сж} = p_b/p_a = 12$, максимальной температуры цикла $T_c = 1600$ К и температуры начала сжатия T_a и степени повышения температуры $\theta_{Ц} = 1,73$. Получаемая при этом работа $L_{уд}$ является удельной, поскольку цикл рассматривается для 1 кг массы рабочего тела. Она соответствует выделенной темным цветом площади рис. 5, которая равна разности работ в турбине (турбинах) и сжатия в компрессоре.

На основании диаграммы рис. 5, для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газозоудушного потока проточной части в соответствии с кривой A-B. Однако, на практике идеальный цикл всегда отличается от реального термодинамического цикла. На это оказывает влияние целый комплекс различных параметров. Важнейшие из них это постоянно увеличивающиеся зазоры между лопатками ротора и статора (рис. 6), лопатками ротора и корпусом компрессора и лопатками статора и ротором. С увеличением зазоров проточной части компрессора снижаются все параметры термодинамического цикла. Увеличение зазоров между лопатками и эле

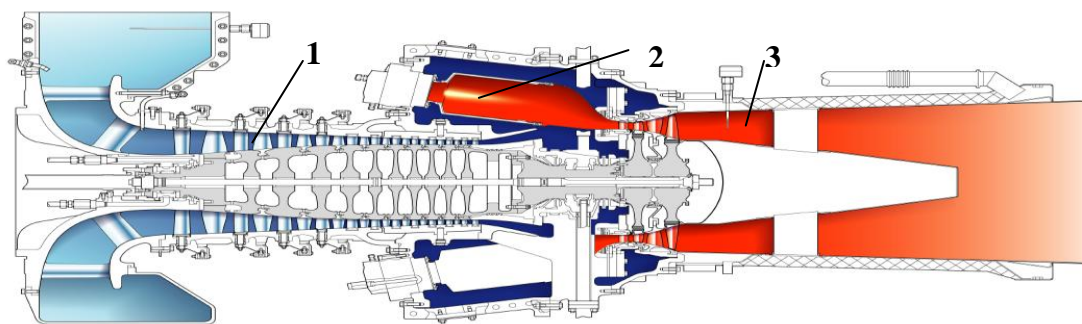


Рисунок 6. Схема однокасадной ГТУ SGT 100 - 1S (тайфун)

ментами проточной части компрессора происходит в основном из-за эрозионно-абразивного их износа и действия целого комплекса других эксплуатационных воздействий. При этом увеличение зазоров между лопатками турбины ротора и лопатками статора происходит из-за эрозионно-абразивного их износа, термохимических процессов и других явлений. На рис. 6 представлена схема однокасадной ГТУ SGT 100 - 1S

(тайфун). Здесь, левая сторона ГТУ - осевой компрессор - 1, центральная часть - камера сгорания – 2, правая сторона – зона турбины компрессора - 3.

3. Структурная надежность ГТУ и методы ее повышения

Одной из важнейших задач на этапе проектирования ГТУ является правильный выбор параметров нормируемых показателей надежности ее элементов и подсистем. Не менее важным является разработка мероприятий, обеспечивающих надежность ГТУ в требуемых (гарантированных) пределах. Для решения этих вопросов необходима разработка соответствующих методов оценки показателей надежности ГТУ в условиях наличия большого числа структурных элементов (лопаток) в подсистемах, образующих сложную структуру [7].

На этапе проектирования ГТУ выполняется структурный анализ надежности, позволяющий раскрыть внутренние связи элементов, подсистем и всей ГТУ в целом. Это дает возможность установить закономерности этих связей и вести управление ими для достижения необходимых параметров надежности на этапах проектирования и выполнения процессов восстановления работоспособности ГТУ при ремонтах. При структурном анализе надежности ГТУ определяется ожидаемая надежность в вероятностном аспекте, характеризующаяся предполагаемыми показателями надежности элементов (лопаток) и подсистем. В этом случае, надежность функционирования ГТУ можно оценивать по вероятности сохранения гарантированного ресурса ее работы.

Надежность ГТУ – свойство системы выполнять и сохранять во времени требуемые эксплуатационные функции в заданных режимах и условиях применения. ГТУ состоит из множества подсистем и элементов (узлов, лопаток и других деталей) образующих определенную структуру. Структурная надежность ГТУ это свойство системы выполнять и сохранять во времени эксплуатационные функции в соответствии со структурой. В данной работе структурная надежность будет определяться на базе безотказной работы ГТУ в соответствии с ее структурно-логической формулой надежности.

Вероятность сохранения безотказной работы ГТУ, состоящей из n подсистем (рис. 3 и рис. 4), за наработку t , определяется по следующей универсальной структурно-логической формуле надежности:

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) \cdots P_i(t) \cdots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (2)$$

где $P(t)$ - вероятность безотказной работы ГТУ за наработку t ;

$P_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -й подсистемы ГТУ за наработку t ;

n – количество подсистем в ГТУ.

Можно привести структурно логические формулы надежности для следующих структурных составляющих ГТУ:

- для турбокомпрессора (рис. 3)

$$P(t) = P_1(t) P_3(t);$$

- для газогенератора структурной схемы рис. 3, а, б

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) P_3(t);$$

- для структурной схемы рис. 3 в, содержащей свободную турбину

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) P_3(t) P_4(t).$$

Структурно-логическая формула надежности для i -й подсистемы ГТУ имеет следующий вид:

$$P_i(t) = \prod_{r=1}^{v_i} p_{ir}(t), \quad (3)$$

где $p_{ir}(t)$ - вероятность безотказной работы r -го элемента (лопатки) i -й подсистемы ГТУ;

v_i - общее количество структурных элементов (лопаток) i -й подсистемы ГТУ.

Если вероятность безотказной работы $p_{ir}(t)$ структурных элементов i -й подсистемы ГТУ выразить через интенсивность отказов, то выражение (3) можно представить следующим образом:

$$P_i(t) = \prod_{r=1}^{v_i} \exp \left[- \int_0^t \lambda_{ir}(\tau) d\tau \right], \quad (4)$$

где $\lambda_{ir}(\tau)$ - интенсивность отказов r -го элемента (лопатки) i -й подсистемы ГТУ.

Проделав соответствующие преобразования, выражение (4) будет иметь вид

$$P_i(t) = \exp \left[- \sum_{r=1}^{v_i} \int_0^t \lambda_{ir}(\tau) d\tau \right]. \quad (5)$$

Лопаточные подсистемы имеют множество лопаток, при этом все лопатки подсистемы обычно идентичны по вероятности безотказной работы. В этом случае, можно записать:

$$p_{i1}(t) = p_{i2}(t) = \dots = p_{ir}(t) = \dots = p_{iv_i}(t) = p_{io}(t); \quad (6)$$

$$\lambda_{i1}(\tau) = \lambda_{i2}(\tau) = \dots = \lambda_{ir}(\tau) = \dots = \lambda_{iv_i}(\tau) = \lambda_{io}(\tau), \quad (7)$$

где $p_{io}(t)$ - вероятность безотказной работы любого элемента (лопатки) i -й подсистемы ГТУ;

$\lambda_{io}(\tau)$ - интенсивность отказов любого элемента (лопатки) i -й подсистемы ГТУ.

Тогда выражения (3) и (5), для определения вероятности сохранения полной производительности элементов (лопаток) i -й подсистемы ГТУ, будут следующие:

$$P_i(t) = [p_{io}(t)]^{v_i}, \quad (8)$$

$$P_i(t) = \exp \left[-v_i \int_0^t \lambda_{ir}(\tau) d\tau \right]. \quad (9)$$

На рис. 7 приведена зависимость вероятности $P_i(t)$ безотказной работы i -й подсистемы ГТУ от общего количества v_i рабочих элементов (лопаток). Расчет выполнен на основании выражения (8) для четырех значений вероятности безотказной работы элементов (лопаток) i -й подсистемы ГТУ: $p_{io}(t) = 0,99999$; $p_{io}(t) = 0,9999$; $p_{io}(t) = 0,999$; $p_{io}(t) = 0,99$.

Анализируя графики рис. 7 можно отметить, что при увеличении числа элементов i -й подсистемы ГТУ, вероятность безотказной работы подсистемы резко уменьшается и особенно значительно при меньших значениях вероятности безотказной работы каждого элемента (лопатки). При этом с увеличением вероятности безотказной работы

элементов (лопаток) можно получить заданную вероятность сохранения безотказности i -й подсистемы ГТУ. Однако, значительное увеличение вероятности сохранения безот-

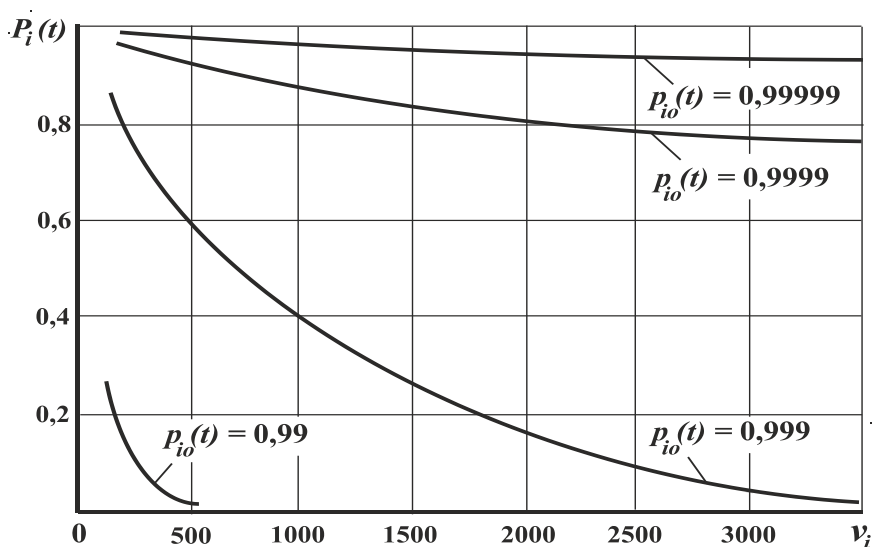


Рисунок 7. Зависимость вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ от общего числа рабочих элементов (лопаток)

казности каждого элемента (лопатки), в ряде случаев, экономически нецелесообразно.

При этом следует иметь в виду, что в условиях невозможности изменения структуры элементов i -й подсистемы ГТУ необходимы специальные методы сохранения работоспособности всей системы в целом. В этом случае, для повышения вероятности сохранения без-

отказности i -й подсистемы ГТУ возможно применение следующих основных методов:

1. Увеличение вероятности безотказной работы каждого структурного элемента (лопатки) ГТУ $p_{io}(t)$ за счет применения специальных материалов, покрытий, увеличения прочности, улучшения конструкции элементов и подсистем ГТУ, обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток [5, 6, 8].

2. Увеличение вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ $P_i(t)$ за счет улучшения условий работы ГТУ и снижение вредных эксплуатационных воздействий на элементы и подсистемы [5, 6].

3. Увеличение вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ $P_i(t)$ за счет применения метода восстановления ее работоспособности на основе замены отработавших структурных элементов новыми элементами в период наработки t (метод внешнего резервирования структурных элементов за счет периодической их замены новыми).

4. Увеличение вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ $P_i(t)$ за счет применения метода восстановления ее работоспособности на основе применения многократного восстановления структурных элементов посредством их ремонта за период наработки t (метод внешнего резервирования структурных элементов за счет их периодического ремонта).

Можно отметить, что применение двух первых методов достаточно широко описано в современной литературе [5, 6].

При этом особый интерес вызывает метод увеличения вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ $P_i(t)$ за счет применения метода восстановления ее работоспособности на основе замены отработавших структурных элементов новыми эле-

ментами в период наработки t (метод внешнего резервирования структурных элементов за счет периодической их замены новыми).

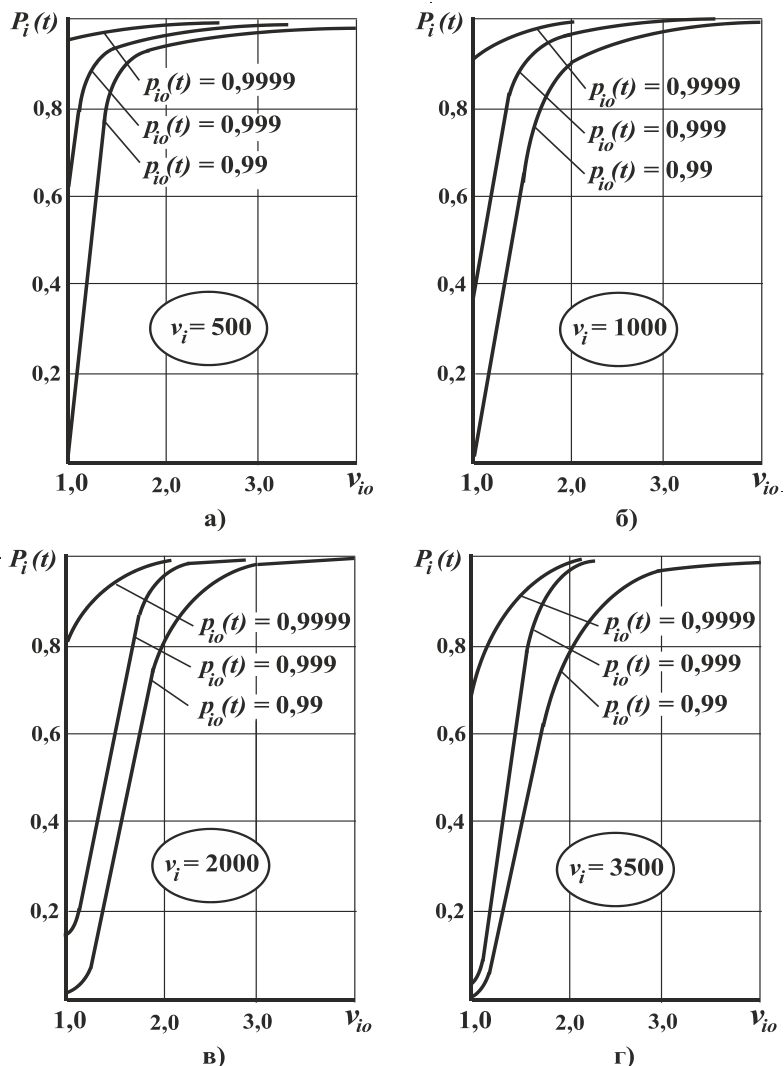


Рисунок 8. Зависимость вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ в зависимости от количества восстановлений рабочих элементов (резервных лопаток) для различных вариантов значений общего их числа: а – $v_i = 500$, б - $v_i = 1000$, в - $v_i = 2000$, г - $v_i = 3500$

обеспечивается достаточно высокая вероятности безотказной работы $P_i(t)$ i -й подсистемы ГТУ. На основании этого, за наработку t , достаточно выполнять 2 ... 3 раза замену структурных элементов подсистемы новыми, при этом обеспечивается вероятность безотказной работы подсистемы выше значения 0,9. Вместе с тем, замена 2 ... 3 раза подсистемы новыми структурными элементами в ряде случаев нецелесообразна. В этом случае, более целесообразно выполнять ремонты одни и тех же структурных элементов (лопаток) и производить восстановление работоспособности всей подсистемы ГТУ. Структурно-логическая формула надежности для i -й подсистемы ГТУ в случае восстановления ее работоспособности путем замены новыми элементами имеет следующий вид:

На рис. 8 представлена зависимость вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ в зависимости от количества восстановлений рабочих элементов (резервных лопаток) для различных вариантов значений общего их числа: а – $v_i = 500$, б - $v_i = 1000$, в - $v_i = 2000$, г - $v_i = 3500$. Здесь, рассматривается случай увеличения вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ $P_i(t)$ за счет применения метода восстановления ее работоспособности на основе замены отработавших структурных элементов новыми элементами в период наработки t (метод внешнего резервирования структурных элементов за счет периодической их замены новыми).

Анализируя графики рис. 8 можно отметить, что при внешнем резервировании структурных элементов за счет периодической их замены новыми, в количестве 2 ... 3 раз,

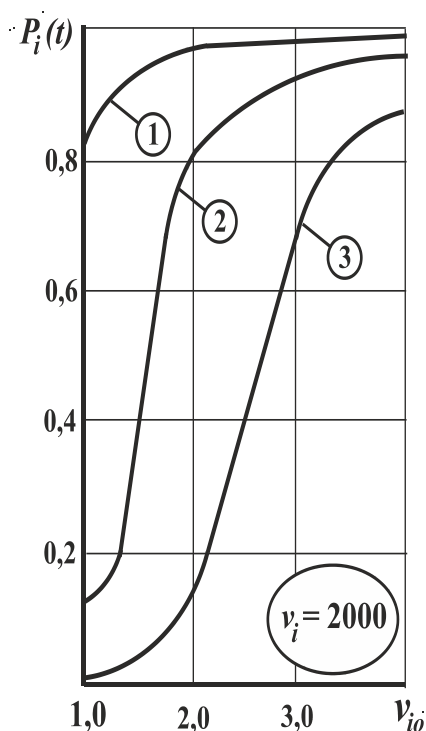


Рисунок 9. Зависимость вероятности безотказной работы *i*-й подсистемы ГТУ в зависимости от количества восстановлений рабочих элементов (лопаток) для $v_i = 2000$ с различными значениями вероятности безотказной работы каждого элемента после его восстановления

ментов (лопаток) для $v_i = 2000$ с различными значениями вероятности безотказной работы каждого элемента после его восстановления. Здесь показано: график 1 - со значениями вероятностей восстанавливаемых элементов $p_{io1}(t, v_{io1} = 1) = 0,9999$; $p_{io2}(t, v_{io2} = 2) = 0,9$; $p_{io3}(t, v_{io3} = 3) = 0,8$; $p_{io4}(t, v_{io4} = 4) = 0,7$; график 2 - со значениями вероятностей восстанавливаемых элементов $p_{io1}(t, v_{io1} = 1) = 0,999$; $p_{io2}(t, v_{io2} = 2) = 0,9$; $p_{io3}(t, v_{io3} = 3) = 0,8$; $p_{io4}(t, v_{io4} = 4) = 0,7$); график 3 - со значениями вероятностей восстанавливаемых элементов $p_{io1}(t, v_{io1} = 1) = 0,99$; $p_{io2}(t, v_{io2} = 2) = 0,9$; $p_{io3}(t, v_{io3} = 3) = 0,8$; $p_{io4}(t, v_{io4} = 4) = 0,7$. В этом случае, при восстановлении работоспособности структурных элементов происходит снижение вероятности их безотказной работы.

Анализируя графики рис. 9 можно отметить, что при различных значениях исходной вероятности сохранения работоспособности структурных элементов при двух

$$P_i(t) = \left[1 - \left[- p_{io}(t) \right]^{v_i} \right]^o$$

где v_{io} - количество замен структурных элементов (лопаток) новыми в *i*-й подсистеме ГТУ.

Наиболее перспективно выполнять увеличение вероятности безотказной работы *i*-й подсистемы ГТУ $P_i(t)$ за счет применения метода восстановления ее работоспособности на основе применения многократного восстановления структурных элементов посредством их ремонта за период наработки *t* (метод внешнего резервирования структурных элементов за счет их периодического ремонта). В этом случае, следует иметь в виду, что вероятность безотказной работы структурного элемента (лопатки) $p_{io}(t)$ от ремонта к ремонту снижается. При этом структурно-логическая формула надежности для *i*-й подсистемы ГТУ в случае восстановления ее работоспособности путем восстановления одних и тех же структурных элементов (лопаток) имеет следующий вид:

$$P_i(t) = \left[1 - \prod_{\eta=1}^{v_{io}} \left[- p_{io\eta}(t, v_{io\eta}) \right] \right]^{v_i}$$

где $p_{io\eta}(t, v_{io\eta})$ - вероятность безотказной работы η - го восстанавливаемого структурного элемента (лопатки) *i*-й подсистемы ГТУ; v_{io} - количество замен структурных восстанавливаемых элементов (лопаток) в *i*-й подсистеме ГТУ.

На рис. 9 показана зависимость вероятности безотказной работы *i*-й подсистемы ГТУ в зависимости от количества восстановлений рабочих элементов

трех восстановлений структурных элементов можно обеспечить высокие значения вероятности их безотказной работы $P_i(t)$ всей подсистемы.

4. Заключение

В представленной работе рассмотрены вопросы повышения структурной надежности ГТУ для нефтегазовой промышленности, а также показаны методы повышения структурной надежности подсистем. Структурный анализ надежности позволяет раскрывать внутренние связи элементов, подсистем и всей ГТУ в целом. Это дает возможность установить закономерности этих связей и вести управление ими для достижения необходимых параметров надежности на этапах проектирования и выполнения процессов восстановления работоспособности ГТУ при ремонтах. При структурном анализе надежности ГТУ определяется ожидаемая надежность в вероятностном аспекте, характеризующаяся предполагаемыми показателями надежности элементов (лопаток) и подсистем. В этом случае, надежность функционирования ГТУ можно оценивать по вероятности сохранения гарантированного ресурса ее работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корж, В. В. Эксплуатация и ремонт оборудования насосных и компрессорных станций: учеб. пособие / В. В. Корж, А. В. Сальников. – Ухта: УГТУ, 2010. – 184 с.
2. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал [Текст]. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. – Вып. № 4 (145). – 182 с.
3. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
4. Рыбаков, Б. А. Особенности сжигания попутного нефтяного газа в газотурбинных установках [Электронный ресурс] / Б. А. Рыбаков [и др.] // Турбины и дизели. – Май-июнь 2008. – С. 2-8. Режим доступа: www.turbine-diesel.ru.
5. Михайлов, В. А., Общие основы и принципы повышения ресурса газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 3 (58). – С. 32-43.
6. Михайлов, В. А. Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. В. Байков // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2017. – №9 – С. 42-48.
7. Михайлов, А. Н. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 421 с.
8. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

Поступила в редколлегию 23.04.2018 г.