

УДК 629.76.762.5

К ВОПРОСУ ЗАДАНИЯ И ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

В статье рассматриваются вопросы, задания и оценки количественных показателей надежности авиационных ракетных двигателей твердого топлива при испытаниях.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, надежность, вероятность возникновения отказа, доверительная вероятность, доверительные интервалы, закон распределения случайной величины, выборка, генеральная совокупность, случайная величина, программа обеспечения надежности двигателя, техническое задание, предварительные испытания, государственные стендовые испытания.

A.G. Shadanov, P.G.

ASSIGNMENT AND EVALUATION OF RELIABILITY RATING OF AIRCRAFT DRY-FUEL ENGINES

The problems of assignment and evaluation of reliability rating of aircraft dry-fuel engines are considered in the article.

Key words: solid fuel rocket engine, reliability, non-fault occurrence rate, confidence level, confidence intervals, the law of the random variable, sample, population, the random variable, the program will ensure the reliability of the engine, requirements specification, preliminary tests, the state benchmark tests.

Введение

Разработка, изготовление, испытания и эксплуатация авиационной техники (АТ) требуют значительных материальных, финансовых и временных затрат. Всемерное сокращение удельных затрат ресурсов на создание и эксплуатацию АТ при одновременном обеспечении ее высокой надежности является одной из наиболее трудных научно-технических задач. Кроме того, проблема обеспечения надежности является одной из важнейших составляющих качества выпускаемой продукции.

Высокий уровень надежности ракетных двигателей (РД) обеспечивается целенаправленной, совместной и скоординированной работой всех предприятий и организаций промышленности и МО РФ, занимающихся данной проблемой.

Цель исследования

- разработать методику назначения, оценки и контроля количественных показателей надежности авиационных РД на различных этапах жизненного цикла;
- обосновать выбор основных законов распределения случайных величин для практического использования при оценке и контроле надежности авиационных РД;
- на основании существующих прикладных методов теории надежности и математической статистики разработать общий принцип выбора показателей надежности РД;
- отработать рекомендации по практическому использованию результатов выполненных исследований для заинтересованных организаций промышленности и МО РФ;
- разработать проект Межведомственной методики по оценке и контролю количественных показателей надежности РД авиационного назначения на этапах ПИ, ГСИ и серийного производства.

Объект исследования

Объектом исследования является РД авиационного назначения, относящийся к невосстанавливаемым системам одноразового использования.

Методы исследования

Совокупность общих методов, позволяющих создавать РД с высокой надежностью и рассчитывать ее количественные показатели, составляет теорию надежности. Получено достаточно много результатов в двух самостоятельно развивающихся направлениях исследований: вероятностно-статистическом (для систем, обладающих сложной многоэлементной структурой и сложными связями между элементами) и детерминированном (для механических систем, конструкций, материалов и т.д.) [3].

В рамках первого направления развиты методы математической оценки надежности, статистической обработки результатов испытаний и эксплуатации, планирования испытаний, контроля и прогнозирования надежности, совершенствования системы эксплуатации изделий.

В рамках второго направления изучены механизмы износа, усталостной прочности и коррозии материалов, разработаны методы расчета материалов на прочность и износ, устанавливаются новые технологические процессы, повышающие уровень надежности материалов и изделий [6].

Результаты исследования

Теория надежности предназначена для выбора оптимальных технических решений, связанных с необходимостью сохранения основных технических характеристик изделия и его составных частей в течение требуемого промежутка времени в установленных условиях эксплуатации и применения [4].

Успехи в решении проблемы повышения надежности изделий обусловлены следующими факторами:

- развитием и внедрением методологических и организационно-технических основ исследования и обеспечения надежности различных образцов АТ;
- совершенствованием методов исследований и обеспечением надежности АТ на каждой стадии ее создания, эксплуатации и применения;
- развитием и внедрением автоматизированных систем проектирования, изготовления и испытаний АТ;
- созданием базы (банка) справочных и нормативных данных.

В процессе разработки, испытаний и эксплуатации образцы авиационной техники могут подвергаться ряду конструктивных доработок и изменений.

Поэтому задачи исследований надежности данных изделий за весь период их жизненного цикла также меняются.

Определение надежности применительно к РДТТ включает:

- выбор задаваемых и оцениваемых количественных показателей надежности;
- нахождение оценок выбранных показателей надежности двигателя по статистическим данным испытаний.

Надежность РДТТ как невосстанавливаемого изделия одноразового использования характеризуется его безотказностью при применении по назначению в заданных условиях эксплуатации в период всего назначенного срока службы.

Под показателем безотказности РДТТ следует понимать вероятность невозникновения отказа (ВНО), которое характеризует степень невозникновения отказа при выполнении требований по условиям эксплуатации и применения двигателя, заданным в техническом задании (ТЗ).

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния двигателя.

Нерабочее состояние – это состояние двигателя, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации [1].

Количественно безотказность РДТТ характеризуется точечной оценкой ВНО и точностью ее определения.

Точность определения точечной оценки ВНО характеризуется нижним односторонним доверительным интервалом, вычисляемым с требуемой доверительной вероятностью.

Требования к надежности изделий и методам контроля их выполнения являются основными элементами управления качеством выпускаемой продукции. В связи с этим по окончании каждого этапа разработки, испытаний и поставки на серийное производство проводятся соответствующие работы для проверки выполнения установленных требований по надежности.

Основной задачей испытаний на данных этапах является расчетно-экспериментальная проверка соответствия или несоответствия фактических значений показателей надежности установленным нормам (требованиям).

Создание авиационных РДТТ требует разработки общего принципа выбора нормируемых показателей надежности, принципов обоснования численного уровня задаваемых показателей, приемлемых по объему выборки, и методов оценки и контроля количественных показателей надежности.

Практика проведения государственных стендовых испытаний (ГСИ) ракетных двигателей твердого топлива указывает на необходимость разработки общего принципа выбора нормируемых показателей надежности для авиационных РДТТ на различных этапах испытаний, серийного производства и эксплуатации в соответствии с предполагаемой генеральной совокупностью (количество РДТТ, используемых на этапах предварительных испытаний (ПИ), лётно-конструкторских испытаний (ЛКИ), ГСИ и в серийном производстве), выборкой (количество двигателей, используемых на каждом этапе испытаний), доверительной вероятностью и заданными в тактико-техническом задании (ТТЗ) на объект показателями надежности, а также на необходимость формирования расчетно-экспериментальных методов оценки этих показателей.

Номенклатуру показателей надежности изделий выбирают в зависимости от класса изделий, режимов его эксплуатации, характера отказов и их последствий, а также принципа ограничения длительности использования.

Все изделия можно условно подразделить на:

- неремонтируемые и невозстанавливаемые изделия общего назначения, составные части изделий, не восстанавливаемые на месте эксплуатации и не подлежащие ремонту, а также невозстанавливаемые изделия самостоятельного функционального назначения;

- восстанавливаемые изделия, не подвергающиеся плановым операциям технического обслуживания;

- восстанавливаемые изделия, подвергающиеся плановым операциям технического обслуживания;

- изделия, предназначенные для выполнения кратковременных заданий.

При выборе того или иного показателя надежности для изделия должен быть выбран характерный временной режим эксплуатации:

- циклический (чередование периодов простоя и действия);

- непрерывный (непрерывный период действия);

- оперативный (чередование неопределенных по продолжительности периодов простоя и действия);

- общий (чередование периодов простоя и действия случайным образом).

В зависимости от последствий отказа изделие может быть отнесено к следующим группам надежности:

– группа изделий, отказ которых влечет за собой угрозу безопасности людей, значительный материальный ущерб;

– группа изделий, для которых в случае отказа материальный ущерб определяется утратой самого изделия или затратами на его восстановление.

В случае создания новых типов систем, эффект от функционирования которых еще недостаточно известен, задание требований по надежности может осуществляться на основе экспертного анализа. В общем случае требования по надежности на системы, особенно модернизируемые, задаются «от достигнутого» на аналогах и прототипах [2].

Если применение системы дает экономический эффект, то его можно сравнить с затратами на создание и эксплуатацию системы. В этом случае имеется возможность решить задачу оптимального уровня надежности, которая может быть определена, если известна структура, облик и характеристики системы, характеристики надежности элементов, процесс функционирования и способы повышения надежности изделий, входящих в систему.

Требования к надежности, задаваемые в ТЗ на двигатель, должны быть подтверждены к концу разработки, перед началом серийного производства и эксплуатации.

Эта процедура является непременным условием последующей успешной эксплуатации двигателя в составе объекта и выполнения им поставленных задач.

Основным источником получения объективной информации о реальной надежности двигателя, его функционировании и причинах отказов являются экспериментальные исследования, испытания и процесс эксплуатации.

Экспериментальные исследования и испытания РДТТ подразделяются на поисковые экспериментальные исследования (исследовательские работы), экспериментальную отработку (доводочные испытания) и завершающие испытания.

Основным этапом отработки двигателя являются завершающие испытания.

Завершающие испытания (ПИ и ГСИ) проводятся на образцах РДТТ, изготовленных по документации, передаваемой в серийное производство и эксплуатацию, в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации. Эти испытания дают наиболее полное представление о работоспособности и надежности двигателя.

Контроль выполнения требований ТЗ по надежности на этапе ГСИ проводится на основе утвержденных НИО заказчика и согласованных с организациями промышленности методик.

Оценка (на этапе ПИ) и контроль (на этапе ГСИ) надежности РДТТ на соответствие установленным в НТД требованиям осуществляется путем сопоставления полученных расчетно-экспериментальным методом данных с требуемым уровнем надежности. При этом расчеты количественных показателей надежности на различных этапах испытаний необходимо проводить при одинаковых значениях доверительной вероятности [7].

При использовании гипергеометрического закона распределения случайных величин нижняя доверительная граница одностороннего доверительного интервала ВНО для различных случаев, возникающих при проведении испытаний РДТТ, будет выражаться следующими формулами [5]:

– отказы двигателя в процессе проведения испытаний отсутствуют:

$$\prod_{k=1}^n \frac{(P_n - \frac{k-1}{N})}{(1 - \frac{k-1}{N})} \leq 1 - \gamma;$$

– в процессе проведения испытаний имеет место один отказ:

$$\prod_{k=1}^n \frac{(P_n - \frac{k-1}{N})}{(1 - \frac{k-1}{N})} \cdot (1 + n \frac{1 - P_n}{P_n - \frac{n-1}{N}}) \leq 1 - \gamma,$$

где P_n – нижняя доверительная граница одностороннего доверительного интервала ВНО; N – объем генеральной совокупности; n – объем выборки из генеральной совокупности "N" (количество испытанных двигателей); γ – доверительная вероятность.

Так как приведенные формулы трансцендентные, то их решение осуществляется методом итераций (последовательных приближений).

Данные расчетные соотношения позволяют для различных значений генеральной совокупности и фиксированного количества выполненных испытаний определять нижние доверительные границы одностороннего доверительного интервала ВНО двигателя с заданным уровнем доверительной вероятности. Кроме того, используя данные расчетные соотношения, можно спрогнозировать требуемое количество РД, которое необходимо испытать в процессе серийного производства и эксплуатации для подтверждения заданных значений ВНО двигателя.

На основании расчетов методом сравнения полученных данных с требованиями, заданными в ТЗ, делается заключение о надежности двигателя.

Исходя из выполненного объема работ и полученных результатов испытаний, в том числе при контроле надежности РД, заказчик по рекомендациям НИО принимает решение о завершении опытно-конструкторских работ, приемке и поставке на серийное производство созданного конкретного образца двигателя.

Анализ нормативно-технической документации на РДТТ авиационного назначения свидетельствует об отсутствии порядка задания количественных требований по надежности и порядка выбора наиболее подходящих и полно характеризующих надежность двигателя показателей, как это определено ГОСТ В 21258. Не установлены достаточно объективные и корректные методы оценки и контроля нормированных показателей надежности РДТТ на этапах ПИ, ГСИ и серийного производства.

Отсутствует алгоритмическое и программное обеспечение расчета количественных показателей надежности РД при использовании сложных аналитических зависимостей гипергеометрического закона распределения.

Кроме того, как показывает опыт военно-научного сопровождения и проведения ГСИ ракетных двигателей авиационного назначения, в организациях промышленности, занимающихся разработкой и испытаниями РДТТ, порядок задания и оценки их показателей надежности осуществляется по-разному.

Поэтому в настоящее время возникла объективная необходимость более строгого и единого подхода к заданию требований по надежности в НТД, анализу, оценке и контролю количественных показателей надежности с применением ПЭВМ и с учетом требований ГОСТ.

При этом анализ соответствующих материалов в данном направлении и полученные результаты исследований показывают, что предложенный методический подход к оценке и контролю показателей надежности РД позволит получать более объективную информацию об их надежности при проведении ПИ, ГСИ и прогнозировать ее в процессе серийного производства и эксплуатации.

Таким образом, исходя из практики проведения испытаний ракетных двигателей твердого топлива, можно сделать вывод о необходимости разработки общего принципа выбора нормируемых показателей надежности для авиационных РДТТ на различных этапах испытаний, серийного производства и эксплуатации, так как требования к надежности изделий и методам контроля их выполнения являются основными элементами управления качеством выпускаемой продукции в интересах государственного заказчика.

Выводы

1. Впервые предложен общий методический подход по формированию обоснованных требований в ТЗ к показателям надежности РД и оценке этих показателей на различных этапах жизненного цикла.

2. Впервые отработаны алгоритмы и реализованы на ПЭВМ программы расчета количественных показателей надежности авиационных РДТТ с использованием гипергеометрического закона распределения случайных величин, позволяющие с достаточным уровнем точности и достоверности проводить оценку данных показателей на этапах ПИ, ГСИ и серийного производства.

3. Обоснована необходимость использования при расчетах надежности двигателя нижней доверительной границы одностороннего доверительного интервала вероятности безотказной работы. При этом точность оценки надежности РДТТ и уровень точности ее оценки неразрывно связаны между собой. Сравнить точности оценок надежности двигателя можно только при одинаковых доверительных вероятностях.

Необходимо отметить, что результаты настоящей статьи обсуждены на технических совещаниях представителей организаций промышленности и МО РФ, на заседаниях государственных комиссий и внедрены в практику отработки в ТЗ требований по надежности к РДТТ, а реализованные на ПЭВМ алгоритмы и программы расчета их количественных показателей надежности использованы во вновь разработанных программах и методиках проведения ГСИ данных двигателей.

Библиография

1. ГОСТ 27.002 Надежность в технике. Термины и определения.
2. *Фахрутдинов И.Х. [и др.]*. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. – М.: Машиностроение, 1987.
3. *Волков Е.Е. [и др.]*. Основы теории надежности ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974.
4. *Базовский И.Б.* Надежность. Теория и практика. – М.: Мир, 1975.
5. *Тескин О.Н.* Оценка надежности систем на этапе экспериментальной отработки. – М.: Изд-во стандартов, 1981.
6. *Павлов И.В.* Статистические методы оценки надежности сложных систем по результатам испытаний. – М.: Радио и связь, 1982.
7. *Аронов И.Э.* Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1987.

Bibliography

1. GOST 27.002 Industrial product dependability. Terms and definitions.
2. *Fakhrutdinov I.K. [et al.]*. The construction and design of the solid fuel rocket engines. – М.: Mashinostroyenie, 1987.
3. *Volkov E.E. [et al.]*. Basics of reliability theory rocket engines. – М.: Mashinostroyenie, 1974.
4. *Bazovsky I.B.* Reliability. Theory and Practice. – М.: Mir, 1975.
5. *Teskin O.N.* Evaluation of systems reliability at the stage of experimental development. – М.: Standards Publishing House, 1981.
6. *Pavlov I.V.* Statistical methods for assessing the reliability of complex systems based on the results of tests. – М.: Radio i svyaz', 1982.
7. *Aronov I.E.* Reliability evaluation based on the results of reduced tests. – М.: Standards Publishing House, 1987.