

выражений (4)—(6) из этого множества отбирались наилучшие сочетания диагностических параметров при  $\alpha = \beta = 0.0005$ .

На рис. 2 представлены сравнительные зависимости количества  $p$  удовлетворяющих условиям поиска решений, полученные с использованием выражений (4)—(6), от минимально допустимого значения целевой функции  $F$ .

## ВЫВОДЫ

Из рис. 2 видно, что решением задачи является не один набор диагностических параметров, а некоторое множество таких наборов, из которых необходимо выбирать лучшее. Критерии (4)—(6) выделяют из множества допустимых наборов наиболее предпочтительные, сокращая тем самым работу лица, отбирающего лучшее решение. В данном случае критерии (5) и (6) дают результаты, которые являются более предпочтительными, чем полученные согласно критерию (4). Критерий (6) оказывается наиболее эффективным при невысоких требованиях к качеству распознавания, т. е. при меньших значениях средней вероятности правильного распознавания по всем классам.

Таким образом, используемые критерии отбора совокупностей диагностических параметров объектов дают возможность существенного сокращения количества рассматриваемых решений в зависимости от применяемой целевой функции на всем интервале изменения минимально допустимого значения целевой функции.

1. Пакет прикладных программ ОТЭКС (для анализа данных) / Загоруйко Н. Г., Елкина В. Н., Емельянов С. В., Лбов Г. С. — М.: Финансы и статистика, 1986.—160 с.: ил.—(Мат. Обеспечение прикладной статистики).
2. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: Пер. с англ. / Под ред. Ю. И. Журавлева. — М.: Мир, 1978.—411 с.

## SELECTION OF INFORMING AGGREGATES OF DIAGNOSTIC PARAMETERS IN TASKS OF IMAGE RECOGNITION

V. D. Pavlenko, A. A. Fomin

The methods of leading multiclass images recognition tasks to sequence of recognition tasks with two classes are analyzed. The method of selection informing aggregate of diagnostic parameters in multiclass images recognition tasks, based on optimization of a goal function is offered. The effectiveness of different types of goal functions application is explored.

УДК 629.7.015

# ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО ПРОЕКТИРОВАНИИ

© С. М. Подольчак

Дніпропетровський державний університет, ФТІ

Дослідження надійності РРД на стадії проектування і конструкторського розроблення грають важливу роль у забезпеченні надійності ракетного комплексу. Мініміально необхідний рівень надійності рідинного ракетного двигуна можна визначити в результаті оцінки і мінімізації сумарних витрат на його створення і застосування, тобто на виконання програми в цілому.

Стадия проектирования, начиная с разработки технического задания и кончая выпуском технической документации на производство, является ключевой в общей проблеме обеспечения надежности жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Проектирование — поисковый, творческий процесс, который включает в себя следующие этапы:

- осознание целей и задач разработки изделия, условий и способов его применения;
- проектную проработку возможных вариантов,

оценку технических возможностей реализации каждого варианта и требуемых затрат;

- выбор наиболее эффективного варианта изделия;
- детальную дальнейшую разработку выбранного варианта, включая выпуск конструкторской документации, изготовления опытного образца и испытания.

Исследования надежности, являясь составной частью проектирования, также имеют поисковый про-

гностический характер, они также разнообразны, как и процесс проектирования. Основные задачи исследования надежности заключаются в установлении обоснованных требований по надежности к ЖРД в целом и его элементам в отдельности, выборе принципиальных решений для обеспечения надежности двигателя.

Как правило, требования к надежности ЖРД задаются в техническом задании главному разработчику изделия в вероятностной форме в виде определенной номенклатуры и количественных значений показателей надежности изделия, а также ряда качественных организационно-технических требований, которые выступают в качестве ограничений и которые необходимо выполнять в процессе создания изделия.

Качественные требования к надежности являются дополнением к количественным требованиям и учитывают ту часть работ по обеспечению надежности изделия, которую не всегда удается формализовать. Однако опыт обеспечения надежности изделий-прототипов свидетельствует о необходимости и полезности реализации совокупности качественных требований.

Как показывает опыт (особенно в последние годы), несмотря на все старания разработчиков, наблюдаются отказы ЖРД, вызванные различными факторами (в том числе и конструкторскими недоработками).

Для предупреждения и выявления отказов конструктивного, производственного и эксплуатационного характера применяют различные методы и средства. В этом случае для ЖРД минимально необходимый уровень надежности можно определить в результате оценки и минимизации суммарных затрат на его создание и применение, т. е. на выполнение программы в целом. При этом приходится учитывать все составляющие суммарных затрат: затраты на разработку, на изготовление и на эксплуатацию всех изделий, обеспечивающих выполнение задачи не менее  $N_{тр}$  с вероятностью безотказной работы (ВБР) не ниже  $P_{тр}$ .

Задание требований по надежности ЖРД и его элементов включает в себя множество этапов, среди которых значительное место занимают такие этапы: нормирование надежности (установление требуемых количественных значений показателей надежности элементов ЖРД) и нормирование доверительных вероятностей или средних квадратичных отклонений, с которыми нормативные значения показателей надежности двигателя должны быть подтверждены к моменту завершения государственных испытаний.

Для нормирования надежности ЖРД использу-

ются различные аналитические и статистические модели и методы в зависимости от его конструктивных особенностей. В общей постановке задача нормирования надежности заключается в отыскании экстремума целевой функции вида

$$g = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

которая выражает зависимость выбранного критерия от оптимизируемых параметров.

Если необходимо спроектировать двигатель с минимальной стоимостью, то в качестве целевой функции выбирают стоимость

$$g = C(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Для расчета математического ожидания суммарных экономических затрат применяется упрощенная расчетная модель, которая должна состоять из следующих основных составляющих.

1. *Модели* связи затрат на проектирование и конструкторскую отработку ЖРД с суммарным объемом доводочных работ, характеризуемым количеством  $N$  огневых испытаний ЖРД:  $C_1 = C_1(N)$ . Расчеты этих затрат проводятся разработчиком двигателя и должны быть представлены разработчику изделия в виде зависимостей от количества огневых испытаний ЖРД в табличной форме или в форме уравнения связи, например

$$C_i = a \cdot N_i^{b_i} + c_i, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — постоянные коэффициенты.

При проведении расчетов могут использоваться данные по стоимости разработки двигателя-прототипа (аналога), а также имеющиеся методические и нормативно-справочные материалы по оценке стоимости разработки ЖРД.

2. *Модели* связи достигнутого при отработке уровня ВБР ЖРД с суммарным объемом доводочных работ:  $P = P(N)$ .

В этом случае в качестве расчетной модели целесообразно использовать так называемую «кривую роста надежности» ЖРД в процессе отработки в виде

$$P = 1 - A \cdot e^{-\alpha(k-1)}, \quad (3)$$

где  $P$  — ВБР ЖРД в  $k$ -м испытании,  $A$  — параметр, характеризующий начальную надежность ЖРД,  $\alpha$  — параметр, характеризующий темп доводки ЖРД,  $k$  — номер испытаний.

Параметры  $A$  и  $\alpha$  определяются разработчиком двигателя на основе статистики испытаний, проведенных при отработке двигателей-прототипов (аналогов) с учетом накопленного опыта конструкторско-доводочных работ.

Наличие модели связи стоимости проектирования

и конструкторской отработки двигателя с числом проведенных испытаний (2) и модели роста надежности двигателя в процессе отработки (3) позволяет перейти к зависимости вида «стоимость — надежность»:

$$C_1^* = C_1^*(P), \quad (4)$$

т. е. связать затраты на проектирование и конструкторскую отработку ЖРД и ВБР двигателя.

3. Модели процесса контроля надежности ЖРД и принятия решения, связывающей уровень ВБР и количество огневых испытаний с вероятностью  $L$  принятия положительного решения о возможности допуска двигателя к ЛИ в составе изделия (или возможности продолжения пусков изделия после доработки двигателя).

Расчетная модель может быть построена на основе методов одноступенчатого, двухступенчатого или последовательного контроля надежности по результатам испытаний ЖРД, проведенных на этапе завершающих доводочных работ, в составе ступени изделия, МВИ и в процессе поставок заказчику.

Осуществление любого из указанных методов контроля надежности требует использование конкретного плана контроля с параметрами:  $P_{np}$  — приемлемый уровень надежности при нормальном ходе производства;  $P_{бр}$  — браковочный уровень надежности двигателя;  $\beta$  — риск заказчика при браковочном уровне надежности;  $\alpha$  — риск поставщика при нормальном ходе производства.

Оперативная характеристика  $L(P)$  плана контроля с известными параметрами представляет собой зависимость вероятности принятия (по результатам контроля) положительного решения о надежности двигателя от уровня его ВБР и является вероятностью принятия решения о допуске двигателя к эксплуатационным испытаниям в составе изделия. Известные методы расчета оперативных характеристик плана контроля используются в модели для определения вероятности допуска  $L(P)$  двигателя к ЛИ (продолжения программы пусков изделия после доработки двигателя) и вероятности  $[1 - L(P)]$  отказа от перехода к ЛИ и необходимости дополнительной доработки (повышения надежности) двигателя.

Вторая внешняя характеристика плана контроля определяет количество испытаний, затрачиваемых на осуществление контроля надежности двигателя. Для одноступенчатого контроля — это объем испытаний выборки двигателей, для двухступенчатого и последовательного контроля — среднее число испытаний, необходимых для проведения контроля и принятия решения.

4. Модели связи экономических затрат на выполнение программы ЛИ и планируемой программы успешных целевых пусков изделия ( $N_{пу}$ ) с уровнем ВБР ЖРД:  $C_2 = C_2(P)$ .

Расчетная модель должна учитывать надежность  $P_{др}$  других систем изделия, среднюю стоимость  $C_n$  одного пуска и средний дополнительный ущерб  $C_{ав}$  от аварийного пуска изделия:

$$C_n = N_n C_n + N_{па} C_{ав}, \quad (5)$$

где  $N_n = N_{пу} / (P \cdot P_{др})$  — математическое ожидание числа пусков изделия для осуществления планируемого числа успешных пусков изделия,  $N_{па} = (1 - P \cdot P_{др})$  — математическое ожидание числа аварийных пусков изделия,  $P \cdot P_{др}$  — вероятность безотказного полета.

В случае, когда связка состоит из  $l$  двигателей, часть из которых ( $s$ ) является резервными, величина ее ВБР определяется соотношением

$$P = \sum_{i=0}^s C_l^s P_i^{l-s} [(1 - P_i)K]^s,$$

где  $P_i$  — надежность одиночного двигателя, входящего в связку,  $K$  — надежность системы резервирования.

Таким образом, расчетная модель затрат на выполнение программы ЛКИ и целевых пусков изделия записывается в виде

$$C_n = \frac{N_{пу}}{P \cdot P_{др}} [C_n + (1 - P \cdot P_{др}) C_{ав}]. \quad (6)$$

Подготовка исходных данных и расчеты производятся разработчиком изделия.

Определяемые в пунктах 1—6 элементы упрощенной математической модели суммарных экономических затрат позволяют записать общее выражение для математического ожидания суммарных затрат в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_z = & C_s(P_s) + L(P_1)C_n(P_1) + W(P_1)C_{дор1}(P_2) + \\ & + W(P_2)L(P_2)C_n(P_2) + W(P_1)W(P_2)C_{дор2}(P_3) + \\ & + W(P_1)W(P_2)L(P_2)C_n(P_3) + \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $P_i$  — уровни ВБР ЖРД, соответствующие числу проведенных испытаний;  $C_s(P_s)$  — математическое ожидание затрат на разработку, доработку и контроль надежности ЖРД с уровнем надежности  $P_s$ ;  $L(P_i)$  — значение оперативной характеристики плана контроля надежности ЖРД с уровнем надежности  $P_i$ ;  $W(P_i) = 1 - \Phi(P_i)L(P_i)$  — вероятность принятия решения о проведении доработки ЖРД от



уровня  $P_i$  до уровня  $P_{i+1}$ ;  $C_{\text{дорп}}(P_{i+1})$  — экономические затраты на доработку ЖРД с целью повышения его надежности;  $\Phi(P_i)$  — вероятность отсутствия отказов ЖРД с уровнем надежности  $P_i$  в серии из  $N_n$  пусков изделия.

Сумма всех нечетных членов выражения (7) характеризует математическое ожидание затрат на проектирование, конструкторскую отработку и повышение надежности двигателя, а сумма четных — характеризует математическое ожидание затрат на выполнение программы ЛИ и целевых пусков изделия.

На основе конкретизации общего выражения (7) для оценки суммарных экономических затрат применительно к особенностям двигателя и изделия в целом должна быть построена расчетная модель, позволяющая провести выбор оптимального по этому критерию значения  $P_{\text{опт}}$ .

В соответствии с выражением (3) уровень ВБР ЖРД однозначно связан с количеством проведенных испытаний двигателя. Это позволяет рассматривать число испытаний наряду с ВБР ЖРД в качестве оптимизируемого параметра.

При построении расчетной модели допускается упрощение общего выражения (7), в частности за счет сокращения числа учитываемых в нем дорабо-

ток двигателя в процессе выполнения программы ЛИ и целевых пусков изделия, если это не ведет к существенной потере точности определения критерия в районе его минимума.

Определение значений критерия по расчетной модели может выполняться либо методом прямого решения конкретизированного общего выражения (7), либо методом статистических испытаний построенной расчетной модели. Последний подход оправдан в случае, когда прямое решение связано с большими вычислительными трудностями.

1. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т., т. 6. Экспериментальная отработка и испытания / Под ред. Р. С. Судакова.—М.: Машиностроение, 1989.—376 с.
2. Проблемы надежности летательных аппаратов / Под ред. И. Ф. Образцова, А. С. Вольмира.—М: Машиностроение, 1985.—276 с.

#### PARTICULARITY OF INVESTIGATION OF RELIABILITY FOR LIQUID ROCKET ENGINE DURING ITS PROJECTING

S. M. Podol'chak

Investigation of LRE reliability during its design and designer mining plays a significant part in security of rocket reliability. A necessary minimum level of LRE reliability can be defined as a result of an estimation and minimization of general costs on its creation and application, that is of the program fulfilment as a whole.

УДК 536.24+621.45

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ У МОБІЛЬНИХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ДВИГУННИХ УСТАНОВОК

© Л. В. Пронь, Л. Б. Кабакова

Дніпропетровський державний університет

Спроектована експериментальна установка для дослідження теплообміну в парогенеруючих установках для утилізації двигунних установок. Отримані експериментальні дані з кипіння води в щільному каналі.

При утилізації двигунних установок виникає необхідність у автономних парогенеруючих установках, властивістю яких має бути мобільність. У лабораторії теплових труб ДДУ розроблено і створено парогенератор нової конструкції, що являє собою великогабаритний замкнутий термосифон (ЗДТ) з рознесеними у просторі зонами нагрівання і конденсації з електричним нагріванням. Парогенератор забезпечує (одночасно з транспортом тепла) високоефективне перетворення електричної

енергії у теплову за рахунок оригінальної конструкції електрододатків.

Парогенеруюча установка, зовнішній вигляд якої поданий на рис. 1, складається з нагрівального контура-випарника і теплообмінника-конденсатора. У свою чергу нагрівальний контур містить у собі електрододатки (зона нагрівання термосифона), паровий колектор, газозбірник і компенсатор.

Конструктивно нагрівальний контур — це горизонтальний циліндричний паровий колектор, на