

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЖРД ПРИ ТОВАРНЫХ ПОСТАВКАХ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Артюхов Ю.А., Кузнецов В.В., Новиков И.К., Сердюк А.Н.  
Космические войска России, г. Москва

В настоящее время в условиях сокращения объемов производства становится актуальной проблема совершенствования системы контроля качества изготовления двигателей при поставках в эксплуатацию с целью сохранения достигнутого уровня их качества и надежности при сокращении экономических затрат на проведение контроля. Обоснование предложений по корректировке планов выборочного периодического контроля агрегатов и узлов двигателей может быть проведено с учетом следующего.

Действующая в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (НТД) система контроля качества изготовления ЖРД является многоуровневой, основанной на контроле качества деталей, узлов, агрегатов и двигателя в целом на всех стадиях производственного процесса, и обеспечивает безопасную, надёжную работу двигателей в эксплуатации. Вместе с тем, в условиях мелкосерийного производства она становится недостаточно экономически эффективной, поскольку стоимость используемых для выборочного контроля как узлов и агрегатов, так и двигателей в целом, включается в стоимость товарной партии, что при сокращении объема партии приводит к увеличению стоимости товарных двигателей. В этой связи является актуальной задачей разработка предложений по совершенствованию системы контроля качества изготовления ЖРД при товарных поставках в эксплуатацию.

Двигатели первой и второй ступени РН типа «Союз» характеризуются высокой степенью преемственности по отношению к двигателям-прототипам и отличаются от них, в основном, конструкцией форсуночной головки. Это позволяет рассматривать результаты испытаний идентичных узлов и агрегатов всех двигателей в качестве априорной информации при оценке возможности сокращения объемов выборочного приемочного контроля (ВПК) узлов и агрегатов первой и второй ступени РН «Союз» в сторону сокращения.

Корректировка планов ВПК допускается НТД, как в сторону усиления, так и в сторону ослабления. Ослабление контроля может вводиться, если в течение установленного в конструкторской документации (КД) периода производства не наблюдалось отказов или дефектов того или иного агрегата, свидетельствующих об ухудшении оценок уровня дефектности товарной продукции. Ослабление контроля при ВПК осуществляется путем увеличения периодичности контроля или числа агрегатов, допускаемых к использованию в составе двигателя.

Имеющиеся положительные результаты контрольных испытаний и эксплуатации двигателей первой и второй ступени РН типа «Союз» в течение 10-ти лет дают основание для оценки возможности ослабления ВПК, как на уровне агрегатов и узлов, так и на уровне ЖРД в целом.

Для выполнения такой оценки воспользуемся следующим методическим подходом.

Пусть к началу ВПК какого-либо агрегата испытано  $N_{\Sigma}$  агрегатов (включая прошедшие КВИ, СПИ, квалификационные испытания, испытания в составе двигателя и РН) и при этом обнаружено  $m \geq 0$  дефектных. Предполагая, что все эти агрегаты принадлежат одной и той же генеральной совокупности с долей дефектности  $q$  и, рассматривая  $q$  как случайную величину, запишем выражение для ее функции распределения

$$F(q_0) = \text{Вер}(q < q_0) = \gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – доверительная вероятность;

$q_0$  – верхняя граница доверительного интервала для входного уровня дефектности  $q$ .

При обработке результатов испытаний в качестве  $q_0$  принимается такой уровень, при котором маловероятно получить число отказов, меньшее или равное  $m$ .

Для биномиального закона распределения числа дефектных агрегатов в испытанной совокупности  $N_{\Sigma}$  (что следует из предположения о постоянстве вероятности появления производственного дефекта) можно записать [1]

$$\sum_{i=0}^m C_{N_{\Sigma}}^i q^i (1-q)^{N_{\Sigma}-i} = 1 - \gamma. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и отбрасывая индекс при  $q_0$ , получим

$$F(q) = 1 - \sum_{i=0}^m C_{N_{\Sigma}}^i q^i (1-q)^{N_{\Sigma}-i}. \quad (3)$$

Функция плотности распределения  $f(q)$  может быть определена дифференцированием выражения (3). Предварительно представим (3) в виде [2]

$$F(q) = \frac{\Gamma(N_{\Sigma}+1)}{\Gamma(m+1)\Gamma(N_{\Sigma}-m)} \int_0^q x^m (1-x)^{N_{\Sigma}-m-1} dx, \quad (4)$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция.

Дифференцируя (4) по  $q$  получим выражение для плотности распределения

$$\Psi(q) = \frac{N_{\Sigma}!}{m!(N_{\Sigma}-m-1)!} q^m (1-q)^{N_{\Sigma}-m-1}. \quad (5)$$

Выражение (5) есть ни что иное, как  $\beta$ -распределение с параметрами  $\alpha = m+1$ ;  $\beta = N_{\Sigma}-m$ .

Зная плотность распределения  $\Psi(q)$ , можно найти распределение числа дефектных агрегатов  $D$  в контролируемой партии объемом  $N$  как

$$F(D) = \int_0^1 \Psi(q) C_N^D q^D (1-q)^{N-D} dq. \quad (6)$$

Подставляя  $\Psi(q)$  из (5), после несложных преобразований получаем выражение для плотности распределения числа дефектных агрегатов в партиях объемом  $N$ , поступающих на контроль

$$F(D) = \frac{N_{\Sigma}! N! (m+D)! (N_{\Sigma} - m + N - D - 1)!}{m! (N_{\Sigma} - m - 1)! D! (N - D)! (N_{\Sigma} + N)!}. \quad (7)$$

Примем следующее критериальное условие для определения параметров плана ВПК ( $N$  – объем контролируемой партии,  $n$  – объем выборки на КВИ от партии): вероятность наличия в прошедшей контроль партии хотя бы одного дефектного агрегата не должна превышать некоторой заранее установленной величины, например, риска заказчика, т.е.

$$P(D \geq 1) \leq \beta_3, \quad (8)$$

где  $D$  – число дефектных агрегатов в партии, прошедшей ВПК;

$\beta_3$  – риск заказчика.

Можно показать, что использование плотности распределения (6) и решающего правила – партия принимается при успешных результатах КВИ и бракуется в противном случае – приводит к следующей зависимости для определения планов ВПК, отвечающей критериальному условию (8)

$$1 - \frac{(N_{\Sigma} + n)(N_{\Sigma} + n - 1) \dots (N_{\Sigma} + n - m)}{(N_{\Sigma} + N)(N_{\Sigma} + N - 1) \dots (N_{\Sigma} + N - m)} \leq \beta_3. \quad (9)$$

Практическое использование неравенства (9) для определения параметров планов ВПК агрегатов ЖРД требует установления допустимых значений риска заказчика по каждому конкретному агрегату. Эта процедура может быть выполнена на основе рекомендаций действующей НТД или; исходя из следующих соображений. Допустим, что применяемый в настоящее время план контроля ( $N_i, n_i = 1$ )  $i$ -го агрегата был назначен  $T$  месяцев назад и на тот момент статистика испытаний, характеризующая уровень дефектности  $i$ -го агрегата в партиях, поступающих на контроль, была представлена результатами  $N_{\Sigma_i}^T$  и  $m_i^T$ . Этой статистике, согласно левой

части неравенства (9), соответствовала вероятность  $P(D \geq 1)$ , равная

$$P(D \geq 1) = 1 - \frac{(N_{\Sigma}^T + 1) N_{\Sigma_i}^T \dots (N_{\Sigma_i}^T + 1 - m_i^T)}{(N_{\Sigma_i}^T + N_i)(N_{\Sigma_i}^T + N_i - 1) \dots (N_{\Sigma_i}^T + N_i - m_i^T)}, \quad (10)$$

которую, учитывая факт принятия плана контроля, приемлемого как для поставщика, так и для заказчика, логично считать допустимым риском заказчика ( $\beta_{zi}$ ) при ВПК  $i$ -го агрегата ЖРД.

Рассмотрим пример. Необходимо оценить параметры плана контроля редуктора Д429-700 ЖРД первой и второй ступени РН «Союз» на начало 2003 года, после 10-ти летней безотказной эксплуатации в составе ДУ РН.

Для данного примера имеем следующие исходные данные:

$$N_i^T = 8; n_i^T = 1; N_{\Sigma i}^T = 455; m_i^T = 0; N_{\Sigma i} = 825; m_i = 0.$$

Последовательно используя соотношения (9) и (10), находим

$$\beta_{zi} = 0,015; N_i = 13; n_i = 1.$$

То есть положительная статистика испытаний редукторов, полученная после определения первоначального плана ВПК, дает основание для ослабления контроля путем увеличения объема контролируемой партии.

Таким образом, предлагаемые соотношения могут быть использованы для корректировки параметров планов ВПК узлов и агрегатов двигателей первой и второй степени РН «Союз» по результатам всех видов контрольных испытаний и эксплуатации серийных экземпляров с целью снижения затрат на проведение контроля без ухудшения показателя эффективности ВПК – вероятности наличия в партии, прошедшей контроль, хотя одного дефектного агрегата.

В качестве другого направления совершенствования системы контроля качества изготовления двигателей первой ступени РН типа «Союз» может рассматриваться совмещение контрольно-выборочных (КВИ) и специальных проверочных (СПИ) испытаний. Известно, что в период 1990...1993 годов произошло резкое (~ в 4 раза) сокращение объема производства двигателей типа РН «Союз». Это сокращение не являлось плановым и было связано с кризисными явлениями в экономике России, которые непосредственно коснулись и ракетно-космической отрасли. После 1993 года объем производства указанных двигателей установился на уровне ~ 50...60 двигателей в год и не ожидается его существенного увеличения в ближайшие 5 лет.

Специфика сложившейся ситуации состоит в том, что годовой объем производства двигателей не обеспечивает комплектование товарных партий для предъявления их на КВИ, проводимых по разработанным ранее планам контроля, действующим на сегодняшний день. Можно показать, что в этом случае при сложившейся системе контроля качества изготовления серийных двигателей происходит увеличение затрат на контроль, приходящихся на один принятый в товар двигатель (удельные затраты на контроль). Действительно, пусть  $K$  – число партий, проходящих ВПК и принимаемых в товар в течение  $T$  лет, а  $N$  – число товарных двигателей в кон-

тролируемой партии. Тогда, учитывая требования НТД о ежегодном проведении, как минимум одного СПИ, получим соотношение для удельных затрат на контроль ( $C_{кюд}$ )

$$C_{кюд} = \frac{KC_{кви} + C_{спи}T}{NK}, \quad (11)$$

где  $C_{кви}$ ,  $C_{спи}$  – стоимости проведения одного КВИ и СПИ соответственно.

Из соотношения (11) легко видеть, что с уменьшением числа партий  $K$  удельные затраты на контроль растут за счет регламента проведения СПИ, установленного нормативно-технической документацией. Иными словами, при сокращении объема производства двигателей происходит увеличение суммарного числа контрольных испытаний (КВИ и СПИ), проводимых при выполнении установленного объема товарных поставок, что, по существу, означает необоснованное усиление контроля. Последнее, применительно к контролю качества изготовления серийных ЖРД первой и второй ступени РН семейства «Союз» в определенной степени противоречит статистике контрольных испытаний и эксплуатации этих двигателей в течение относительно длительного периода времени. Так, за период 1992...2002 гг. из почти 170 запусков РН семейства «Союз» не было ни одного случая отказов рассматриваемых двигателей. В соответствии с идеологией НТД в случае, когда в течение установленного в конструкторской документации периода производства при контроле качества изготовления и эксплуатации не наблюдалось отказов или дефектов по производственным причинам, появляются основания для ослабления используемого плана контроля.

Возможным вариантом разрешения сложившейся противоречивой ситуации могло бы стать совмещение контрольно - выборочных и специальных проверочных испытаний. В этом случае, как видно из соотношения (11), величина удельных затрат на контроль не будет зависеть от числа  $K$  и, следовательно, не будет наблюдаться необоснованного усиления контроля.

Практическая реализация идеи совмещения КВИ и СПИ потребует прежде всего решения вопроса о программе совмещенного испытания. Как правило, программы КВИ являются менее напряженными по сравнению со СПИ по уровням основных параметров (давлению в камере сгорания, соотношению компонентов топлива и времени работы), определяющих условия работы двигателя при испытании. В связи с этим очевидно, что при проведении КВИ по программе СПИ повышается вероятность отказа двигателя и, соответственно, браковки товарной партии.

С другой стороны, проведение СПИ по программе КВИ не соответствует основной цели СПИ – проверке работоспособности двигателя в гарантийных пределах по условиям работы.

Возможным решением вопроса о выборе программы совмещенного контрольного испытания (СКИ) могла бы стать программа, сочетающая в себе типовые фрагменты программ КВИ и СПИ и эквивалентная по уровню нагружения двигателя программе КВИ. При этом в качестве методической

основы для формирования программы СПИ предлагается сравнение уровней нагружения двигателей в том или ином контрольном испытании проводить с использованием так называемого энергетического критерия имитации режимов эксплуатации технических систем [3]. Суть этого критерия, согласно работе [3], состоит в равенстве сообщенных технической системе энергий в режимах эксплуатации и форсированного испытания. При этом критерий применим для испытаний, проводимых в диапазоне форсирования условий работы технической системы, в котором сохраняется автоточность механизмов возникновения и развития отказов системы.

Возвращаясь к рассматриваемым двигателям, следует признать, что положительная статистика контрольных испытаний двигателей первой и второй ступени РН типа «Союз», может служить подтверждением автоточности механизмов возникновения и развития отказов в диапазонах условий работы, реализуемых при КВИ и СПИ. А раз так, то примем в качестве критерия идентичности уровней нагружения двигателей при контрольных испытаниях равенство работ, совершаемых двигателями в этих испытаниях, т.е.

$$\sum_{i=1}^m A_i^{КВИ} = \sum_{i=1}^n A_i^{СПИ}, \quad (12)$$

где  $m, n$  – число установившихся режимов работы двигателей по программам КВИ и СПИ, соответственно;

$A_i$  – величина работы, совершаемая двигателем при  $i$ -ом установившемся режиме работы.

Для определения величины  $A_i$  воспользуемся соотношением

$$A_i = W_i \tau_i, \quad (13)$$

где  $W_i$  – мощность ракетного двигателя на  $i$ -ом режиме работы;

$\tau_i$  – время функционирования двигателя на  $i$ -ом режиме работы.

В теории ракетных двигателей [4] под мощностью двигателя понимается кинетическая энергия реактивной струи, вытекающей в единицу времени, т.е.

$$W_i = G_i \frac{W_{ai}^2}{2}, \quad (14)$$

где  $G_i$  – секундный расход топлива на  $i$ -ом режиме работы двигателя;

$W_{ai}$  – скорость продуктов сгорания топлива на срезе сопла при работе двигателя на  $i$ -ом режиме.

Используя известные зависимости для  $W_{ai}$  и  $G_i$  [4]

$$W_{ai} = I_{yi} - \frac{P_{ai} F_a}{G_i}, \quad (15)$$

$$G_i = \frac{F_{sp} P_{kj}}{\beta_i}, \quad (16)$$

где  $I_{yi}^n$  - удельный импульс тяги двигателя на  $i$ -ом режиме;

$P_{ai}$  - давление на срезе сопла при работе двигателя на  $i$ -ом режиме;

$\beta_i$  - расходный комплекс при работе двигателя на  $i$ -ом режиме;

$F_{кр}$  - площадь критического сечения сопла.

Получаем расчетное соотношение для  $A_i$

$$A_i = \frac{1}{2} m_{\Gamma} (I_{yi}^n - E_i f \beta_i)^2, \quad (17)$$

где  $m_{mi}$  - масса топлива, израсходованного на  $i$ -ом режиме работы двигателя;

$E_i$  - степень расширения сопла на  $i$ -ом режиме работы ЖРД;

$f$  - уширение сопла.

Полученная зависимость для  $A_i$  является функцией основных параметров (давления в камере сгорания, соотношения компонентов топлива, времени работы), определяющих условия функционирования двигателя при работе на установившемся режиме и задаваемых в программах контрольных испытаний.

Определение входящих в зависимость для  $A_i$  величин не представляет сложности, что позволяет использовать предложенный энергетический критерий для формирования программы совмещенного контрольного испытания.

В заключение следует отметить, что если изложенный выше методический подход к формированию программ совмещенных контрольных испытаний носит предварительный характер, то предложение о совмещении КВИ и СПИ имеет объективные основания для своей реализации - положительную статистику испытаний и эксплуатации двигателей и возможность сокращения затрат на контроль качества серийного изготовления.

#### Список литературы

1. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1965.
2. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1983.
3. Шевченко С.Н. Методы форсированных испытаний технических систем. М.: МО СССР, 1989.
4. Алемасов В.Е. и др. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980.