

УДК 519.88: 629.7

Е. П. Назаренко, С. В. Якимец

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведено описание методики расчета, проведен анализ и определены диапазоны оптимальных значений вероятности безотказной работы пневмогидравлической системы подачи компонентов топлива и ее элементов, исходя из общих требований к ракете космического назначения.

Запропоновано опис методики розрахунку, проведено аналіз і визначено діапазони оптимальних значень імовірності безвідмовної роботи пневмогідролічної системи подавання компонентів палива та її елементів, виходячи із загальних вимог до ракети космічного призначення.

The calculation procedure is proposed, the analysis is made and the ranges of optimal probability values of no-failure operation of pneumohydraulic propellant supply system and its elements are determined based on general requirements to integrated launch vehicle.

Для потребителей космического рынка очень важным фактором является надежность ракет-носителей (РН). Противоречия между высокими требованиями к показателям надежности ракет космического назначения (РКН), которые ведут к повышению затрат, и рыночной ситуацией, требующей снижения стоимости пусков обуславливают необходимость определения некоторых минимальных значений показателей надежности РКН, которые удовлетворяли бы предъявляемым требованиям и позволили бы минимизировать затраты на разработку и отработку РКН и ее элементов. Одним из наиболее применяемых показателей надежности в ракетной технике является вероятность безотказной работы (ВБР) агрегатов, систем и РКН в целом.

Целью публикации является описание простой методики определения требуемых значений ВБР пневмогидравлических систем подачи (ПГСП) компонентов жидкого топлива в двигатели РКН и входящих в состав ПГСП агрегатов автоматики (АА), сигнализаторов давления и других элементов. Кроме того, приведены результаты определения оптимальных значений ВБР.

Для оценки показателей надежности использован алгоритм определения значений от общих к частным. В качестве исходных

общих требований к надежности приняты требования, предъявляемые к РКН.

Первоначально проводится определение требуемых показателей надежности для структурных единиц РКН. Разбиение РКН на структурные единицы может быть различным. Для примера приводим одну из используемых структур РКН, которая включает следующие элементы:

- первая ступень РКН;
- вторая ступень РКН;
- система управления РКН;
- система управления расходом топлива (СУРТ);
- система контроля заправки (СКЗ);
- система контроля температур (СКТ);
- система разделения ступеней и отделения головного обтекателя;
- система безопасности полета;
- разгонный блок;
- космическая головная часть.

Приведенные структурные единицы (СЕ) с точки зрения определения показателей надежности являются независимыми, никакая СЕ не дублирует и не резервирует другую, работоспособность РКН зависит от работоспособности всех структурных единиц одновременно. В соответствии с [1] имеем структуру n из n , т. е. последова-

тельную структуру. Последовательная структура дает оценку надежности системы "снизу" [1]. Исходя из этого, ее использование является корректным и приемлемым для определения требуемых минимальных значений показателей надежности составных частей РКН, в том числе ПГСП и ее элементов. Структурная схема определения ВБР РКН приведена на рисунке.



С учетом предположения независимости составных частей и отсутствия их взаимного дублирования определение значений ВБР РКН на любом из этапов работы для последовательных структур проводится по формуле

$$P_{РКН} = \prod_{i=1}^n P_{Ci},$$

где $P_{РКН}$ – ВБР РКН;
 P_{Ci} – ВБР i -той составной части РКН;
 n – количество структурных единиц РКН, задействованных в работе.

Для последовательных структур наиболее важным (фактически определяющим надежность всей цепи) элементом является элемент с наименьшей надежностью. Принимая $P_C = \min(P_{Ci})$ и используя модель цепи [2], с учетом того, что надежность n -звенной цепи не меньше, чем надежность отдельного звена, возведенная в n -ю степень, получим формулу для определения предельного нижнего значения показателя надежности системы $P_{РКН}$ в виде:

$$P_{РКН} = P_C^n.$$

Отсюда следует, что ВБР составной части РКН P_C может проводиться по формуле

$$P_C = \sqrt[n]{P_{РКН}}.$$

Данный подход будет в дальнейшем применен и для определения минимальной ВБР для ПГСП, а с учетом некоторых до-

пущений – и для составляющих ее элементов (АА, сигнализаторов давления).

ПГСП структурно и конструктивно входит в состав ступеней РКН. Для анализа принято разбиение ступеней РКН на следующие структурные единицы:

- маршевый двигатель;
- ПГСП;
- система крена;
- система гидроприводов;
- двигательная установка малой тяги;
- система конструктивных элементов.

При оценке ВБР ПГСП, как правило, используют ее разбиение на функциональные подсистемы. Один из вариантов разбивки включает следующие подсистемы:

- заправка-слив;
- топливная;
- захолаживание двигателя и расходных магистралей;
- зарядка-сброс газов и высокого давления;
- обдув дренажно-предохранительных клапанов;
- пожаропреупреждение;
- управляющее давление;
- предварительный наддув;
- основной наддув;
- предохранение баков;
- пассивация.

Эти подсистемы в значительной степени отличаются по количеству элементов, на разных этапах работы ПГСП могут включать одни и те же элементы, которые могут иметь функции резервирования и дублирования, часто их схемы надежности имеют сложные последовательно-параллельные структуры. При данном разбиении достаточно сложно выделить какие-то общие требования для элементов ПГСП.

Для оценки минимального значения ВБР элементов ПГСП более применима структура с разбиением не на подсистемы, а на группы однородных функциональных элементов с точки зрения надежности. В качестве варианта предлагается разбиение на следующие группы:

- АА;
- сигнализаторы давления;

- пироклапаны и прорывные мембраны;
- баллоны и емкости;
- соединительные трубопроводы, жиклеры и фильтры;
- средства обеспечения сплошности;
- топливные баки.

В данном случае при определении ВБР элементов ПГСП все неподвижные элементы (баллоны и емкости, соединительные трубопроводы, жиклеры и фильтры, средства обеспечения сплошности, топливные баки) можно включить в СЕ ступени – "система конструктивных элементов" и не рассматривать при определении минимальных показателей ВБР ПГСП. Такое исключение является вполне допустимым. ВБР неподвижных частей обеспечивается принятыми коэффициентами запаса и проводимой экспериментальной отработкой. Исходя из опыта работ, значения ВБР неподвижных конструктивных элементов равны 0,999999999 и выше. Данные значения практически не вносят никаких изменений в значения показателей ВБР ПГСП, которые меньше на 4-5 порядков, поэтому при анализе могут не учитываться.

Таким образом, при определении ВБР ПГСП и минимальных значений ВБР элементов ПГСП достаточно рассмотреть первые три группы элементов: АА, сигнализаторы давления, пироклапаны и прорывные мембраны.

Анализ работы элементов ПГСП показывает, что их отказы, как правило, являются событиями независимыми. Если рассматривать работу элементов на всех этапах подготовки и пуска РКН, то в общем случае отсутствует их дублирование или резервирование и требуется работоспособность всех задействованных в ПГСП элементов. Таким образом, мы имеем последовательную структуру, и для определения минимальных значений ВБР элементов ПГСП также можно использовать описанный выше подход.

При расчетах в качестве отправных точек приняты требования ВБР РКН во время подготовки к пуску и пуска, а также в процессе выведения КА. Использование дан-

ных отрезков работы РКН связано с тем, что, с одной стороны, в этих операциях, как правило, задействованы разные подсистемы и элементы ПГСП, а с другой – к наземным операциям предъявляются более жесткие требования. Причем для РКН среднего и легкого классов требования к надежности более высокие, чем к ракетам тяжелого класса. Пилотируемые системы не рассматриваются.

Выбор значений показателей надежности РКН проведен с учетом сложившейся практики их назначения и результатов эксплуатации наиболее надежных РКН. Согласно [3] нормативные значения показателей надежности РН выбирают в диапазоне 0,985-0,995, контрольный уровень 0,975-0,99 при $\gamma = 0,9$. Более 45 успешных пусков, что соответствует потенциальному уровню надежности 0,97, имеет ограниченное число РН (в частности, "Союз-У" – 0,972; "Дельта-2" – 0,985; "Ариан-4" – 0,972). Для носителей разработки КБ "Южное" [4] "Циклон-2" (ни одной аварии) показатель –1,0; "Циклон-3" – 0,958; "Зенит-3SL" – 0,88.

Анализ ВБР для разрабатываемых в настоящее время РКН проведен для следующих значений:

- ВБР за время подготовки к пуску и пуска РКН легкого и среднего классов – не менее 0,97, тяжелого класса – 0,96;
- ВБР в процессе выведения КА РКН легкого и среднего классов – не менее 0,96, тяжелого класса – 0,95.

Для анализа показателей перспективных РКН приняты следующие значения ВБР:

- за время подготовки к пуску и пуска – 0,99;
- в процессе выведения КА – 0,98.

В результате расчетов требуемая ВБР для ПГСП разрабатываемых изделий находится в пределах от 0,9983 до 0,9993, перспективных РКН – от 0,9995 до 0,9998. Выход значения ВБР ПГСП за нижний предел может привести к снижению ВБР всей РКН и невыполнению требований тактико-технического задания (ТТЗ), превышение верхней границы диапазона нецелесообразно, поскольку надежность РКН определяет-

ся ВБР самого ненадежного элемента и повышение надежности какой-либо одной системы практически не приводит к желаемому повышению надежности всей РКН. Исходя из полученных значений, при создании ПГСП ее ВБР ниже 0,998 является неприемлемой, выше 0,9998 – не обязательной, не требуемой условиями разработки РКН. В общем случае следует ориентироваться на значения 0,9993-0,9995.

Анализ состава и циклограмм работы ПГСП различных наименований и модификаций РКН показал, что, несмотря на имеющееся многообразие схем и условий работы, общее количество задействованных с точки зрения обеспечения надежности ПГСП элементов колеблется от 35 до 45 единиц.

Для определения крайних значений ВБР элементов ПГСП минимальное количество задействованных в работе элементов составляет 40, для учета унификации изделий и возможных изменений в ПГСП максимальное число для расчетов – 50 элементов, для перспективных разработок – 60 элементов.

Результаты расчетов показывают, что для разрабатываемых изделий требуемые минимальные значения ВБР элементов ПГСП в зависимости от конфигурации РКН и этапа работы находятся в пределах от 0,99995 до 0,99999, для перспективных разработок соответственно – от 0,999991 до 0,999997. Учитывая необходимость унификации, для охвата большинства вариантов использования разрабатываемых в настоящее время РКН в ТЗ на разработку элементов ПГСП следует ориентироваться на верхнюю границу диапазона значений ВБР АА – 0,99999.

Для перспективных разработок достаточно значение ВБР АА 0,999997.

В большинстве случаев структурная схема оценки надежности ПГСП включает последовательно соединенные элементы, в частности АА. Как было упомянуто ранее, для последовательной структуры наиболее важным элементом является элемент с наименьшей надежностью. При разработке ПГСП и АА следует стремиться к

достижению ВБР АА значений, которые незначительно превосходят минимально необходимое значение 0,99999.

Значительное повышение значений ВБР отдельных АА по отношению к минимально необходимым нецелесообразно по нескольким причинам. Прежде всего, это ведет к значительным дополнительным затратам. С другой стороны, для существующих требований к надежности РКН повышение ВБР отдельных АА, начиная с уровня 0,9999999, практически не оказывает влияния на ВБР ПГСП и РКН.

Выход ВБР АА за нижний предел может привести к снижению ВБР ПГСП и всей РКН и невыполнению требований ТТЗ. Использование АА со значениями ВБР ниже 0,99999 возможно в конкретных случаях и должно быть подтверждено соответствующим анализом и расчетами ВБР ПГСП и РКН в целом. В противном случае должно быть предусмотрено дублирование или резервирование элемента с низкой ВБР. Исходя из [1], дублирование следует выполнять на уровне элемента, а не на уровне системы.

В [5] отмечается, что при разработке РН тяжелого класса особенно важным является вопрос обеспечения надежности. Использование удачных решений, применяемых на существующих системах, позволяет существенно снизить стоимость и сроки разработок новых изделий, обеспечить высокий уровень их надежности.

Выполненные ранее разработки были ориентированы, в первую очередь, на обеспечение максимальных показателей надежности и в меньшей мере были ограничены в объеме затраченных средств. Это позволило получить АА и соответственно ПГСП, которые по значениям ВБР превосходили предъявляемые требования. Так, разработанные на ГП "КБ "Южное" АА имеют подтвержденные экспериментальной отработкой значения ВБР выше 0,99999, многие из них – выше 0,999997, соответственно значения ВБР ПГСП разработанных РКН – выше 0,9998 [6]. Исходя из достигнутых значений ВБР, данные АА могут быть использованы во вновь разрабатываемых

РКН, в том числе в перспективных РКН с повышенными показателями надежности.

Предлагаемая методика дает простой подход к вопросу определения и оценки требуемых значений ВБР ПГСР и ее элементов исходя из общих характеристик РКН. Анализ дает оптимальные диапазоны значений ВБР. Использование данных материалов поможет сократить время и средства на разработку ПГСР РКН и входящих в нее элементов. Особенно это может быть полезным на ранних стадиях проектирования РКН, когда необходим быстрый экспресс-анализ требуемых показателей ВБР для определения возможности использования существующих АА в новых РКН. А также при необходимости разработки новых АА – для задания требуемых значений их ВБР.

Методология может быть использована для решения аналогичных задач по другим агрегатам и системам.

Список использованной литературы

1. Берлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Пер. с англ. – М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1984. – 328 с.
2. Ллойд Д., Липов М. Надежность. Организация исследования, методы, математический аппарат / Пер. с англ.; Под ред. Бусленко Н. П. – М.: Сов. радио, 1964. – 686 с.
3. Обеспечение надежности перспективных средств выведения / <http://www.sciential.ru/technology/kosmos/199.html>.
4. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро "Южное" / Под общ. ред. С. Н. Конюхова. – Днепропетровск: ГКБ "Южное" им. М. К. Янгеля, 2000. – 236 с.
5. Дегтярев А. В. и др. Системный подход к разработке семейства модульных ракет-носителей / А. В. Дегтярев, А. Э. Кашанов, Н. Г. Литвин, В. А. Шульга // Вісник ДНУ (Сер. РКТ; вип. 15), Т. 1. – 2012.
6. Анализ надежности пневмогидравлической системы подачи компонентов топлива основной конструкции первой ступени РН "Таурис-П": Техн. Отчет / Таурис-П. 21.18231.123 ОТ ГП "КБ "Южное", 2016. – 35 с.

Статья поступила 15.03.2017