

DOI:  
**УНИФИЦИРОВАННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ**

**Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва  
ул. Профсоюзная д.65  
yurk@ipu.ru, lkrykova@ipu.ru*

*Аннотация: Механизмы поддержания технического состояния сложной системы рассматриваются с приоритетом совершенствования программного обеспечения. Дано развитие методологического подхода к сведению в единую расчетную схему оценок надежности функциональных блоков человеко-машинного комплекса, разработанных в различных организациях, с учетом квалификации операторов, работающих с этими блоками. Для оценок технического состояния функциональных блоков космического комплекса предложен векторный критерий, позволяющий учитывать изменение важности компонентов рассматриваемого объекта в зависимости от динамики внешних условий.*

Ключевые слова: унифицированное описание технического состояния, векторный критерий, сложная система, человеко-машинный космический комплекс, надежность функциональных блоков, подготовка операторов, алгоритмы расчетов, верификация технического задания.

## **Введение**

Анализ становления математической теории надежности показал, что на ее начальном этапе оценивались отказоустойчивость и ремонтпригодность машин и механизмов. На втором этапе получил развитие симбиоз математических методов и физики построения элементной базы электронных схем. На третьем этапе стали использоваться методы системного анализа, появились структурные схемы надежности – началась эпоха оценки надежности сложных систем.

Современная тенденция к расширению функций систем управления технологическими процессами определила формирование четвертого этапа развития теории надежности. Наступает эра компьютеризации технологических процессов. На четвертом этапе определяющими в оценке надежности системы становятся алгоритмы и характеристики применяемого программного обеспечения (ПО).

В данной работе предлагается методологический принцип доминирования важности параметров ПО, используемого в обеспечении устойчивости работы сложной системы с помощью стабилизации ее технического состояния (ТС).

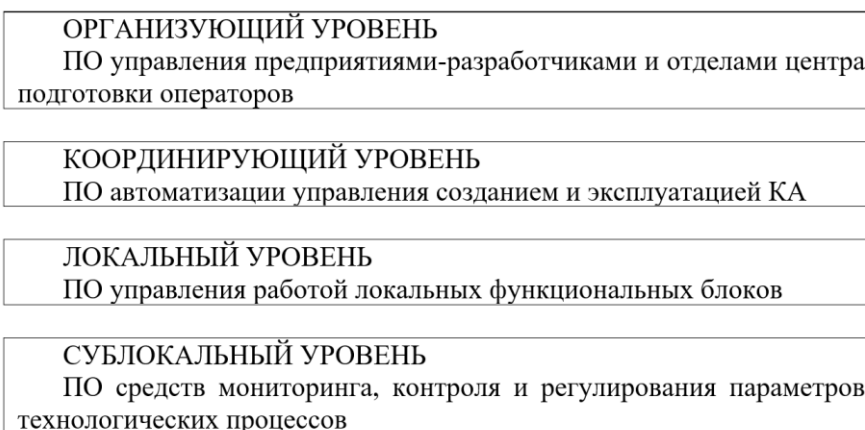
Под оценкой ТС будем понимать разницу между оценкой надежности рассматриваемого объекта, рассчитанной по результатам мониторинга его параметров в заданный момент времени, и нормативными значениями, например, определенными в картах рабочих режимов. В практических разработках такое понимание определяет постановку задач развития математического обеспечения надежностного проектирования функциональных блоков (ФБ) сложных систем.

Примем, что в нашем рассмотрении термин «сложная система» не противопоставляется «несложной», но является обозначением ее описания. Традиционно система характеризуется значениями параметров средств, определяющих связи между ее элементами. Сложная система описывается функциями, характеризующими взаимодействия этих элементов.

Следует учитывать, что если значения параметров, определяющих ТС элементов рассматриваемой системы, принято «мониторить», то с помощью современного ПО возможно выявлять алгоритм изменения этих параметров, формируя характеристику функций взаимодействия элементов. В качестве таких элементов будем рассматривать функциональные блоки (ФБ). В состав ФБ могут входить программно-технические средства (ПТС) и управляющие ими операторы. Важной особенностью ФБ является разнородность назначения и, соответственно, конструктивных решений.

В этом случае корректность оценки ТС такой системы и рекомендаций по его поддержанию предлагается обеспечивать с помощью унифицированных механизмов оценки ТС ее ФБ.

В данной работе в виде сложной системы рассматривается многоуровневый человеко-машинный комплекс низкоорбитальных космических аппаратов (КА). В развитие результатов, опробованных согласно работам в рамках контракта с Государственной корпорацией по космической деятельности «Роскосмос», предлагается пример структуры ПО такого комплекса, показанный на рис. 1. В качестве его ФБ рассматриваются ПО бортовой и наземной аппаратуры. Например, бортовой построитель вертикали, программные средства обеспечения надежности электропитания, наземные системы корректировки орбиты, управляемые операторами, и т. д. [1].



*Рис.1. Уровни ПО человеко-машинного космического комплекса*

Под космическим комплексом (КК) будем понимать сложную систему, включающую в себя КА и наземные средства контроля и управления. Локальными будем называть блоки, выполняющие конкретную технологическую функцию. При межуровневом рассмотрении (согласно рис. 1) локальный ФБ может быть представлен как сложная система.

В соответствии с задачей унификации механизмов оценки ТС рассматриваемого КК примем, что формульное выражение характеристики ТС ФБ, методологически близко положениям ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения». В нашем случае показатели ТС будем оценивать через их относительные значения:

$$(K_{if} - K_{ib})/K_{ib},$$

где:  $K_{if}$  – фактическое значение  $i$ -го показателя ТС, при  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$K_{ib}$  – базовое значение  $i$ -го показателя ТС, при  $i = 1, 2, \dots, n$ .

В зависимости от цели оценки ТС базовые значения показателей предлагается выбирать согласно табл. 1.

*Таблица 1. Базовые значения показателей ТС ПТС как ФБ*

Цель оценки ТС ПТС	Базовые значения показателей ТС ПТС
Обоснование параметров новых ПТС, подготовка технического задания на разработку, регламента, НД, технических условий	Установленные при прогнозировании параметров, разрабатываемых и/или подлежащих поставке на производство новых ПТС
Принятие решения по результатам испытания разрабатываемых ПТС	Установленные техническим заданием на разработку испытуемых ПТС
Принятие решения по результатам приемочного контроля изготовленного ПТС	Установленные стандартами и техническими условиями на изготавливаемые ПТС
Входной контроль	Занесенные в приложение к договору о поставке ПТС
Плановый мониторинг	Установленные картами рабочих режимов и техническими условиями на эксплуатируемые ПТС
Принятие решения по результатам ремонта ПТС	Установленные стандартами и техническими условиями на отремонтированные ПТС

Если базовое значение не определено, то возможна оценка соответствия состояния ПТС техническим требованиям, установленным нормативными документами на его разработку, поставку, испытания, производство, аттестацию или ремонт.

## **1 Особенности оценки ТС локальных блоков космического комплекса**

Опыт работы КА на околоземных орбитах показал вероятность появления новых эффектов при воздействии не только факторов неизвестного происхождения, но и при сочетании воздействий

известных факторов. В таких условиях значительно повышается актуальность проблемы оценки ТС и надежности КК в целом.

Традиционно, оценки воздействия околообъектовой среды проводятся с помощью ПО комплекса сервисов – строителей коммуникаций. Такой комплекс автоматизированной идентификации коммуникационного процесса строится на четырех базовых элементах: канал, отправитель, получатель и сообщение. Тип канала определяется типами отправителя, получателя и сообщения. К числу базовых каналов связи строителя коммуникаций относятся:

- сервис анкетирования агентов (web-сервис сайт-интегратора);
- сервис системы электронных сообщений (для обмена пакетами результатов мониторинга и настройки на регламент/протокол технологических процессов);
- сервис системы субъектно-ориентированной информатизации (для автоматизации распределенного сбора информации в консолидированный аналитический отчет, заказываемый ЦУПом);
- сервис многоагентных систем управления (например, строитель контроллинга процессов управления работой корректирующих двигателей);
- сервис планирования и реализации рассылки результатов мониторинга (отчетных данных по текущему состоянию работы локальных информационно-управляющих ФБ КК).

Важным фактором в организации создания КК является одновременное участие нескольких предприятий, среди которых выделяется головное. Как правило, головное предприятие помимо разработки ФБ и систем собственными силами, осуществляет общее руководство и координацию, а также обеспечивает сбор всей конструкторско-технологической документации.

В результате на этапе эксплуатации оперативность в коррекции управляющих воздействий часто бывает не достаточна для обеспечения устойчивости работы КА при влияниях внешней среды. Более того, отсутствие средств идентификации сбоев и отказов на большинстве отечественных КА затрудняет выявление причин аварий. Следовательно, требуется не только расчет надежности функциональных систем, проводимый на земле, но и регулярный контроль ТС каждого ФБ во время полета.

Таким образом, для продукции различных разработчиков необходимо обеспечение единообразия в проведении расчетов надежности и согласовании получаемых результатов. С этой целью используются и периодически актуализируются нормативные документы, регламентирующие порядок задания требований, контроля и проведения расчетов показателей надежности. Однако системы КК с огромным числом ФБ настолько сложны, что существующие схемы оценки их ТС не всегда применимы для решения прикладных инженерных задач. Поэтому неизбежно возникает ряд допущений и ограничений, приводящим к новым несогласованиям в расчетах.

Например, зная интенсивность отказа ФБ (как системы элементов сублокального уровня), используя экспоненциальный закон распределения, вероятность безотказной работы (ВБР) этого ФБ в течение расчетного срока принято определять с помощью рекуррентного выражения [2]:

$$P_N(T) = P_{N-1}(T) + \int_0^T p_n(\tau, T) \cdot f_{N-1}(\tau) d\tau,$$

где:  $P_N(T)$  – ВБР системы из  $N$  элементов в течение времени  $T$ ;

$P_{N-1}(T)$  – ВБР системы из  $(N-1)$  элементов в течение времени  $T$ ;

$p_n(\tau, T)$  – ВБР  $n$ -го (подключаемого) элемента в течение периода времени от  $\tau$  до  $T$ ;

$f_{N-1}(\tau)$  – плотность распределения отказов системы из  $(N-1)$  элементов для момента времени  $\tau$ ;

$$f_{N-1}(T) = -\frac{P_{N-1}(T)}{dT}.$$

Однако такой подход имеет существенный недостаток – интенсивность отказов системы, которая имеет резерв в своем составе, перестает быть постоянной во времени. На практике этот факт игнорируется, и для систем высокого уровня составляются свои схемы надежности, а элементы системы нижнего уровня по-прежнему рассматриваются с использованием экспоненциального закона распределения отказов.

В настоящее время ставится задача повышения срока активного существования КА. В этой связи повышается актуальность обеспечения ВБР бортовой аппаратуры на срок больший, чем определяемый существующими нормами, возникает существенное завышение функции надежности. Таким образом, получение значения ВБР и работа только с этим значением основаны на значительной потере информации о ТС КА. Возникает необходимость минимизации погрешностей, которые, согласно схемы на рис. 1, образуясь на нижних уровнях, постепенно накапливаются на верхних. Подход,

предлагаемый нами в [2], позволяет рассматривать оценки ТС ПТС (полученные на результатах расчетов надежности) в унифицированной форме и избежать потери информации при переходе от устройств, созданных различными разработчиками, к единым системам, поднимаясь от уровня к уровню.

Развитие этого подхода для оценки ТС человеко-машинного КК определило актуальность введения нового критерия оценки ТС. Предлагаемые в данной работе методологические положения, основанные на оценках ВБР ПТС в сочетании с оценками компетентности операторов, которые поддерживают ТС ряда ФБ, определяют механизмы использования такого критерия.

**Векторный технико-экономический критерий оценки ТС ФБ ( $W$ ).** Будем полагать, что в терминах данной работы, перспективным направлением является создание механизмов оценки ВБР объекта, которые характеризуют не просто конечный результат, а динамику его ТС, т. е. зависимость надежности от времени. Особенность такого рассмотрения состоит в том, что вследствие динамики внешних условий приоритеты важности затрачиваемых ресурсов использования могут меняться, причем задачи ПО в системах более высокого уровня должны рассматриваться на основе результатов решения задач на нижестоящем уровне.

Пусть имеется локальный ФБ, установленный на КА с целью реализации некоторого технологического процесса, управляемого с земли. Вероятность получения результатов, ожидаемых от использования данного блока, рассмотрим, исходя из того, что в такой ФБ входят элементы двух типов: ПТС и операторы.

В формализованном представлении каждый элемент обозначим  $S^{ir}$ , где  $i = 1, 2, 3$  индекс элемента;  $r = 1, 2, 3, \dots, R$  индекс функционального назначения элемента. Для каждого  $r$ -го назначения можно выделить от 1 до  $I$  различных элементов, т. е.  $\{S^r \in S^r_i, i = 1, 2, 3, \dots, I, \forall r\}$ .

Параметры, значения которых характеризуют ТС элементов  $\{S^{ir}(m_j), i = 1, 2, 3, \dots, I, j = 1, 2, 3, \dots, J, \forall r\}$ , обозначим  $M = \{m_j, j = 1, 2, 3, \dots, J\}$ . Теперь для обеспечения надежности работы каждого элемента ФБ наша задача сводится к формированию требований к  $M$ , при которых элементы, входящие в ФБ, могут обеспечить такое ТС, что вероятность достижения цели использования этого блока будет соответствовать требованиям, определенным заказчиком.

В общем виде векторный критерий оценки ТС ФБ ( $W$ ) можно записать:

$$(1) \quad \{W_1, W_2\} \subset W,$$

где:  $W_1$  – первый частный критерий характеризует ТС ПТС на данных его структурной надежности;  $W_2$  – второй частный критерий характеризует ТС ФБ на данных функциональной надежности операторов, определяемой рациональностью вложения ресурсов в их подготовку соответственно критерию  $W_1$ .

С помощью критерия  $W$  поддержание ТС ФБ можно обеспечивать на основании последовательного применения частных критериев. Предлагаемый алгоритм такого обеспечения включает в себя этапы:

1) определение ограничений в применении ПТС согласно условиям ( $U(m_j)$ ), целям ( $L(m_j)$ ) и функциям ( $P(m_j)$ ) ФБ;

2) расчет ТС ПТС согласно критерию  $W_1(U(m_j), L(m_j), P(m_j))$ ;

3) формирование требований к характеристикам ФБ, обеспечивающих его ТС согласно расчету критерия  $W_2(Z)$ , где  $Z$  – объем затраченных ресурсов, при ограничениях, характеризуемых критерием  $W_1(U, L, P)$ .

Теперь задачу расчета ТС ФБ можно представить в унифицированной форме:

$$(2) \quad \min W_{2i}(m_j, j = 1, \dots, J) \forall U^k_i, i = 1, \dots, P;$$

$$(3) \quad \max W_{1i} = f(m_j) \forall L_i, U_i, P_i,$$

где выражение (2) – целевая функция обеспечения ТС ФБ; а выражение (3) – ограничения.

Задачу формирования искомой совокупности требований запишем как регламентацию значений  $M = \{m_j, j = 1, 2, 3, \dots, J\}$ , при которых характеристики ПТС, входящих в  $\{S_i(m_j), i = 1, 2, 3, \dots, I, j = 1, 2, 3, \dots, J\}$ , обеспечат требуемую надежность ФБ. В этом случае введение частного критерия  $W_1$  предполагает:

- выявление факторов, влияющих на надежность ПТС (технические дефекты, логические ошибки, функциональные ошибки);
- регламентацию характеристик, определяющих надежность ПТС (наработка на отказ, коэффициент готовности к работе, показатель функциональной безопасности, коэффициент тестопригодности);

- оценку важности характеристик, определяющих надежность ПТС (формирование шкалы оценок важности сбоев и их последствий, разработка требований к механизму управления влиянием факторов, влияющих на надежность).

Задача минимизации критерия  $W_2$  в данной работе сводится к определению условий максимизации срока использования ПТС при минимизации расходования ресурсов на подготовку операторов данного ФБ. За критерий надежности ФБ принято соотношение ВБР ПТС (критерий  $W_1$ ) и эффективность использования ФБ, определяемая профессиональной подготовкой операторов.

В данном рассмотрении при анализе надежности ФБ в качестве бракующего условия было принято наличие ошибки в результатах работы, влияющей на достижимость цели использования ФБ. Анализ условий возникновения таких ошибок показал, что они появляются в двух случаях:

- вследствие недостатков в вербальной постановке задачи в полетном задании, что не связано с внешними воздействиями или процессами использования ФБ;
- при событии, называемом «помеха в применении». Однако несущественная помеха может не повлиять на результаты использования ФБ, а существенная приводит к нарушению его работоспособности. Такое нарушение может явиться следствием появления ошибок оператора. Например, недостатки ПО могут увеличить время расчета [6] в результате решение о коррекции параметров ФБ будет принято, но в это время необратимые изменения уже произойдут.

Практика использования критерия  $W_1$  показывает, что для минимизации ресурсов, необходимых для максимизации ТС ФБ, требуется ранжирование параметров множества  $M$  по ценности. Для этого в выражении (3) определяются  $m_j$ , наиболее влияющие на надежность получения результата использования ФБ, и формулируются причины появления бракующих условий.

**Механизм оценки вероятности безотказной работы ПТС согласно критерию  $W_1$ .** Пусть в полетном задании определена допустимая надежность работы локального ФБ. Представим технологию подготовки к такому использованию в виде Марковской цепи событий, определяемых вероятностями взаимодействия ПТС как элементов данного ФБ, которые разработаны на разных предприятиях. В [2] показано, что эффективность идентификации ТС ФБ в КК с помощью многокритериальных оценок во многом обеспечивается совместимостью ПТС и взаимосвязанностью результатов расчетов для каждого ФБ по каждому из критериев.

Для обеспечения допустимого значения ТС ФБ предлагаемый механизм предусматривает формирование стратегий, характеризуемых оценками корректности выбора элементной базы, безошибочности ПО, рациональности технологических приемов сборки ПТС. В данной работе такие стратегии предлагается характеризовать значениями вероятностей перехода между событиями Марковской цепи. В этом случае в качестве компонент, определяющих искомые вероятности, примем:

- конечное множество стратегий  $K_i$ , где  $i$  – номер стратегии, ориентированной на изменение параметров элемента  $S$  при его состоянии  $d$ ;
- матрицы переходов  $П_{[d]}^{(k)}$ , соответствующие принятой  $k$ -й стратегии;
- матрицы потерь в ТС  $R_{[d]}^{(k)}$ , отражающие снижение надежности ФБ.

Представим модель подготовки ФБ кортежем  $\langle K_i, П_{[d]}^{(k)}, R_{[d]}^{(k)} \rangle$ . Реализацию стратегии на каждом этапе подготовки назовем частным управлением. Если в работе ФБ задействован  $S$  и принимается стратегия  $k_i^s \in K_i$ , то блок получает эффект от использования  $r_i^{(k)}$ . На последующем шаге состояние ФБ определится вероятностью  $P_{ij}^{(k)}$ , то есть вероятностью того, что от использования  $S_i^k$  будет переход к использованию  $S_j^k$ , если выбрана стратегия  $K_i$ . Очевидно, что общие потери являются случайной величиной, зависящей от начального ТС ФБ и его надежности, обеспечиваемой средней согласованностью оценок ТС на различных предприятиях-разработчиках.

Теперь стратегию  $k$  можно представить в виде последовательности событий с вероятностями  $p = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ , где вектор управления:  $f_n = \langle k_1, k_2, \dots, k_n \rangle$ . Задание такой стратегии означает полное описание событий в виде результатов каждого из этапов подготовки ФБ в зависимости от ТС, в котором он находится в этот момент.

Итак, для реализации выбранной стратегии будем использовать рекуррентный метод. В связи со сравнительно небольшим числом предприятий – разработчиков (шагов)  $n$  применим схему последовательной оптимизации потерь ТС на каждом шаге (принцип Беллмана) с использованием рекуррентного уравнения вида:

$$u_i(n+1) = \max_k [q_i^k + \sum_{j=1}^M P_{ij}^{(k)} \cdot V_j(n)],$$

где:  $u_i(n+1)$  – полные ожидаемые сбои в ТС ФБ;  $(n+1)$  шагов, если ФБ находится в состоянии  $i$ ;  
 $Q_i^k = \sum_{j=1}^M P_{ij}^{(k)} \cdot r_{ij}^{(k)}$  – непосредственно ожидаемая ВБР ФБ, в том числе потери ТС, проявляющиеся в виде отказа на одном шаге, если процесс начался с  $i$  состояния;

$u_i(n)$  – величина полных ожидаемых потерь ТС за  $n$ - прошедших шагов.

Теперь критерий  $W_1$  можно записать:  $W_1[U_i(n+1)] = \max_k \sum_{j=1}^N p_{ij}^k [r_{ij}^k + V_i(n)]$ .

### Механизм формирования требований для обеспечения ТС ФБ согласно критерию $W_2$ .

Рассмотрим особенности применения схем ранжирования параметров, наиболее важных для обеспечения ТС ФБ в КК. Одним из наиболее простых методов введения весовых коэффициентов является линейная свертка  $M = \sum_i \alpha_i m_i$ , где  $m_i$  – значение  $i$ -го параметра, а  $\alpha_i$  – его «вес», определенный оператором. Согласование «весов» может быть проверено автоматически или полуавтоматически [4]. Технически это можно реализовать достаточно просто. Однако в практических расчетах точность линейных оценок часто проблематична.

Обычно процессы получения информации о работе сложных систем, управляемых операторами, носят нелинейный характер. Например, картина поведения оператора в новых для него условиях может быть полностью противоположной картине поведения в привычной ему обстановке. Причем, точки бифуркации могут определяться не изменением параметров среды, а ходом процессов адаптации данного оператора. Наконец, собственно во внешней среде могут происходить изменения (вынужденные или спонтанные) с явно нелинейными характеристиками.

Для обеспечения устойчивости работы ФБ, управляемого оператором, предлагается в ПО средств автоматизации управления таким ФБ использовать схему распознавания образов. В нашем случае, для принятия решений о стабилизации ТС ФБ, свертку множества  $M$  предлагается проводить с помощью выделения кластеров информации по следующим этапам:

I Пространство значений характеристик ТС ФБ разбивается на области, соответствующие рангам важности, определенным экспертами  $G_1, \dots, G_m$ . В пространстве значений этих характеристик выделяются области  $D_i, i = \overline{1, m}$ , эквивалентные рангам их важности. Это значит, что если характеристика, имеющая значения параметров  $x_1^0, \dots, x_n^0$ , относится к рангу  $G_i$ , то точка, представляющая ее, принадлежит области  $D_i$ .

Строятся разделяющие функции  $F_i(x_1, \dots, x_n)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , обладающие следующим свойством: если характеристика, определяется значениями параметров  $x_1^0, \dots, x_n^0$ , относится к рангу  $G_i$ , то величина  $F_i(x_1^0, \dots, x_n^0)$  должна быть максимальной.

Если через  $\bar{x}_q$  обозначить вектор значений параметров, являющихся критериями важности характеристик, относящийся к классу  $K_q$ , то  $F_q(\bar{x}_q) > F_s(\bar{x}_q)$ ,  $q, s = \overline{1, m}$ ,  $s \neq q$ . Таким образом, в пространстве значений этих критериев важности характеристик граница разбиений  $K_i$ , выражается уравнением:  $F_q(x) - F_s(x) = 0$ . Она является решающей границей между областями значений критериев  $D_i$ .

II Для распознаваемой характеристики ТС вводится мера близости рангу  $G$ , определенному разработчиком ФБ. Для введения такой меры близости между этими рангами в  $n$ -мерном векторном

пространстве значений характеристик используется метрика:  $d(g_p, g_q) = \sum_{j=1}^J (x_p^j - x_q^j)^2$ .

В качестве меры близости предлагается среднеквадратичное расстояние между распознаваемой характеристикой  $g$  и совокупностью характеристик  $(G_{q1}, \dots, G_{qm})$ , представляющих ранг  $G_q$ :

$$L(g, G_q) = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S d^2(g, g_{qs})}$$

При учете «весов» и значений критериев характеристик предлагается метрика:

$$L(g, G_q) = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{j=1}^S k_j (x_j - x_{qsj})^2},$$

где  $k_j$  – «вес»  $j$ -го критерия,  $x_{qsj}$  – значение  $j$ -го критерия  $s$ -ой характеристики, принадлежащей рангу  $G_q$ .

III Критериальное пространство разбивается на возможные ранги важности. Так как по значениям отдельной характеристики нельзя определить ее ранг, то вычисление оценок степени близости ранга предлагается проводить не последовательным сопоставлением отдельных значений критериев, а сопоставлением их сочетаний.

Содержательно, это значит, что множество рангов  $G$  требуется разбить на такие подмножества (классы)  $g_1, \dots, g_l$ , чтобы они не пересекались, т. е.  $g_i \cap g_j = 0, (i \neq j)$  и были по возможности максимально удалены друг от друга. При этом среднеквадратичный разброс (если выбрана эта мера) в подмножествах рангов можно вычислять выражением:

$$H(G_i, G_j) = \max_{\substack{i \neq j \\ i=1, \dots, l \\ j=1, \dots, l}} \sqrt{\frac{1}{s_i s_j} \sum_{k=1}^{s_i} \sum_{l=1}^{s_j} d^2(g_{ik}, g_{jl})}.$$

В результате любой элемент из  $G_l$  должен попадать в одно из подмножеств, т. е.  $\bigcup_{i=1}^l G_i = G$ , а

каждое подмножество – состоять из «наиболее похожих» элементов, т. е. элементы внутри подмножества должны характеризоваться выражением:

$$E(G_p) = \min_{\substack{k \neq l \\ k_p=1, \dots, K_p}} \sqrt{\frac{2}{k_p} \cdot \frac{1}{k_{p-1}} \sum_{k=1}^{K_p} \sum_{l=1}^{K_p} d^2(g_{pk}, g_{pl})}.$$

С помощью предложенного подхода была построена модель, где в соответствии с целями использования ФБ, каждый из его элементов (ПТС и операторов) характеризовался параметрами  $\{m_j, j = 1, 2, \dots, J\}$ , значения которых были сгруппированы, и в соответствие каждой группе поставлены обобщенные величины  $\{K_j\}$ . Данная модель явилась инструментом для изучения связи значений критерия надежности ПТС и выделенных обобщенных величин, характеризующих стратегии  $K$ . С ее помощью возможно исследование корреляционных зависимостей между  $K$  и расчет регрессии:  $W_2 = f(Q(m_j), K)$ . Предполагается, что повышение надежности исследуемого ФБ обеспечивает снижение затрат на поддержание его ТС.

Введение критерия  $W_2$  позволяет оценить соответствие результатов применения данного локального ФБ требованиям полетного задания. Кроме того, точность и однозначность формулировки каждого из этих требований должны показать, что они не конфликтуют друг с другом, а также отсутствуют конфликты между требованиями к ПТС и к возможностям операторов.

Особенностью предлагаемого подхода к согласованию расчетов является то, что для обеспечения надежности ФБ требуется верификация не только полноты технического задания, но и тестов для его проверки. Следовательно, требуется сопоставление результатов тестирования с точки зрения разработчика и результатов проверок с точки зрения тестировщика. В результате возможна максимизация эффективности обеспечения надежности ФБ с помощью формирования алгоритмов, учитывающих организационные условия, оцениваемые по результатам сопоставления результатов испытания его характеристик с результатами испытания тестов, включающих в себя сочетание сценариев тестирования конкретных процедур и результатов работы ФБ.

**Особенности расчета надежности ФБ сублокального уровня.** В нашем рассмотрении базу для оценки ТС ФБ предлагается формировать на результатах расчета надежности компонент ФБ сублокального уровня. Традиционно методы расчета надежности таких средств базируются на статистическом анализе эмпирических данных об их отказах. На статистических методах обычно строится мультипликативный алгоритм расчета, в котором прогнозируемая интенсивность отказов определяется произведением базового значения ( $\lambda_b$ ) и ряда коэффициентов, влияющих на надежность ФБ. Например, прогнозируемая интенсивность отказов ( $\lambda_p$ ) определится:  $\lambda_p = \lambda_b \pi_q \pi_s \pi_e$ , где:  $\pi_q$  – коэффициент качества;  $\pi_s$  – коэффициент нагрузки;  $\pi_e$  – коэффициент, учитывающий условия применения ФБ [5].

Основным недостатком такого метода расчета является отсутствие учета того, что из-за отличий в допусках, используемых разными разработчиками при расчете надежности, коэффициенты могут находиться на самом низком или высоком значениях. Поэтому оценки прогнозируемого ТС при экстремальных условиях могут стать нереально большими или маленькими.

Нами предлагается уточнять расчеты интенсивности отказов с помощью включения коэффициентов, учитывающих условия применения и специфику компонент, которые влияют на надежность. Особенностью такого уточнения является введение в расчет общей интенсивности отказов функциональной составляющей. Например, «привнесенный дефект» или «дефект не найден». Предлагаемый подход позволит:

- использовать существующую инфраструктуру сбора данных, т. е. обновлять величины используемых коэффициентов, если в базы данных вводятся новые значения интенсивности отказов;
- применять адресность работы, эффективную даже при выключенном состоянии ФБ, кроме того, при использовании аддитивного/мультипликативного методов расчета зависимые отказы взвешиваются в соответствии с оперативным профилем (рабочим циклом и интенсивностью цикла);
- учитывать фактические причины отказа компонента, т.к. виды наблюдаемых распределений отказов основаны на эмпирических данных.

Таким образом, на основе материалов, опубликованных Американским Информационно-аналитическим центром «Надежность» (RIAC) [6], для оценки ТС ФБ предлагается схема расчета интенсивности отказов в виде сочетания аддитивного и мультипликативного методов с возможностью предсказывать такую интенсивность в соответствии с целевым назначением ФБ и динамикой нагрузок:

$$(4) \quad \lambda_p = \lambda_0 \pi_0 + \lambda_e \pi_e + \lambda_c \pi_c + \lambda_i + \lambda_{sj} \pi_{sj},$$

где:  $\lambda_p$  – расчетное значение интенсивности отказов компонента;

$\lambda_0$  – интенсивность отказов при рабочих нагрузках;

$\pi_0$  – коэффициент нагрузки на ФБ в рабочих режимах;

$\lambda_e$  – интенсивность отказов, обусловленная внешними условиями;

$\pi_e$  – коэффициент окружающей среды;

$\lambda_c$  – интенсивность отказов, связанная с температурными циклами или включением – выключением питания;

$\pi_c$  – коэффициент циклических нагрузок;

$\lambda_i$  – интенсивность отказов, связанная с привнесенными воздействиями или электрическими перенапряжениями или статическим электричеством;

$\lambda_{sj}$  – интенсивность отказов паяных соединений;

$\pi_{sj}$  – коэффициент для паяных соединений.

В более общем случае выражение оценки интенсивности отказов ФБ (4) запишется:

$$(5) \quad \lambda_p = \lambda_{IA} (\pi_P + \pi_D + \pi_M + \pi_S + \pi_I + \pi_N + \pi_W) + \lambda_{SW},$$

где: сумма  $\pi$  – коэффициентов (в скобках) представляют собой суммарный множитель, который учитывает процессы, протекающие при разработке, изготовлении или эксплуатации ФБ. Сумма значений этих коэффициентов должна быть равна единице.

$\lambda_p$  – прогнозируемая интенсивность отказов системы;

$\lambda_{IA}$  – первоначальная оценка интенсивности отказов (для новых моделей);

$\pi_P$  – коэффициент для комплектующих;

$\pi_D$  – коэффициент для проектирования;

$\pi_M$  – коэффициент для производства;

$\pi_S$  – коэффициент для управления ФБ;

$\pi_I$  – коэффициент для привнесенных дефектов;

$\pi_N$  – коэффициент для неопределенных дефектов;

$\pi_W$  – коэффициент для компонентов подверженных износу;

$\lambda_{SW}$  – прогнозируемая интенсивность отказов.

Дополнительными коэффициентами, которые могут быть включены в выражение (5), являются учет влияний периода приработки элементов ФБ, окружающей среды и повышения надежности за счет совершенствования элементной базы и конструктивных решений. В нашем случае выражение оценки интенсивности отказов ФБ в этом случае запишется:

$$(6) \quad \lambda_p = \lambda_{IA} (\pi_P \pi_{IM} \pi_E + \pi_D \pi_G + \pi_M \pi_{IM} \pi_E \pi_G + \pi_S \pi_G + \pi_I + \pi_N + \pi_W) + \lambda_{SW},$$



где:  $P_{IM}$  – коэффициент влияния приработки элементов ФБ;

$P_E$  – коэффициент влияния окружающей среды;

$P_G$  – коэффициент увеличения надежности.

Поскольку каждый из коэффициентов в формуле (6) влияет не на все коэффициенты в формуле (5), они должны применяться избирательно, по мере необходимости. Например, нагрузки от влияния окружающей среды, как правило, ускоряют развитие функциональных дефектов.

Таким образом, применение уточненных форм расчета дает возможность количественных оценок воздействий для различных условий эксплуатации. Расчеты динамики ТС КК показали, что методологически формулы (4–6) позволяют вносить исправления в оценки надежности компонентов ФБ, при смене их разработчиков.

Важным условием использования предлагаемых форм расчета является превышение интенсивности отказов компонент относительно интенсивности отказов ФБ в целом. Такое положение возникает в случае простых конструктивно-технологических решений ФБ. Следует отметить, что результаты, изложенные в данной статье, основаны на анализе эксплуатации малых КА. Для оценки интенсивности отказов формулы (4–6) использовались в условиях средних нагрузок для низкоорбитальных КА.

Усложнение функций КК и повышение требований к ТС их компонентов сдвигает причины отказов от несовершенства характеристик компонентов к уровню системных погрешностей, влияющих на полноту выполнения заданных функций в целом [7]. В том числе повышается важность верификации технических заданий на разработку ПО, во многом определяющего функциональную надежность КК. Отдельным поправочным коэффициентом должен выразиться учет количества отказов, возникающих из-за некомпетентности разработчиков и изготовителей, например, наличие таких факторов выражается в дефектах конструкции и в организации производства.

**Выводы.** Надежностное проектирование КК предполагает, что данные об его ТС должны распределяться по категориям причин сбоев и отказов. Важной особенностью представления контролируемых процессов взаимодействия между ФБ и компонентами этих ФБ является учет системной динамики синергетических эффектов от влияния разнообразных факторов. Предлагаемый подход поддержания ТС КК концептуально ориентирован на использование методологии управления слабоформализуемыми процессами с нелинейностью, нестационарностью и распределенностью. Учет характеристик ФБ, влияющих на ТС сложной человеко-машинной системы определяет методологические возможности сведения в единую расчетную схему оценки ТС ФБ, разработанных в различных организациях, и подготовки операторов, работающих с этими блоками.

Применение описанных механизмов показывает, что компьютерные алгоритмы верификации полетного задания должны учитывать сочетание характеристик ПТС и компетентности операторов с учетом приоритетов оценок их функциональной надежности и с ограничениями по затратам ресурсов. Методологию обеспечения единообразия методов проведения расчетов и согласования результатов оценки ТС КК как сложной системы предлагается базировать на введении векторного критерия  $W$ , который в зависимости от полетных заданий и условий организации разработок учитывает изменение приоритетов важности компонентов рассматриваемого КК.

## Литература

1. Юркевич Е.В., Кривопалов Д.М., Крюкова Л.Н. Программный продукт «Автоматизированная система оценки технического состояния уникальной бортовой аппаратуры космического аппарата длительного функционирования», Серебряная медаль в номинации «Технологические комплексы и установки» на 9-й Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир человек-2019» (Барнаул, 22 -24 мая 2019г.).
2. Юркевич Е.В., Кривопалов Д.М., Крюкова Л.Н. Алгоритмические особенности надежностного проектирования бортовых систем космических аппаратов //Вестник Южно-Сибирского государственного университета. 2019. № 2, С.18-27.
3. Липаев В.В. Функциональная безопасность программных средств. - М.: СИНТЕГ. 2004. – 138с.
4. Трахтенгерц Э.А., Иванюков Е.Л., Юркевич Е.В. Современные компьютерные технологии управления информационно-аналитической деятельностью. - М: СИНТЕГ. 2007. –243с.
5. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. - СПб.: Политехника. 2000. – 248с.
6. Handbook of 217plus TM Reliability Prediction Models // RIAC, Air Force Research Laboratory, AFRL – Information Directorate, Attn: R. Hyle 525 Brooks Road Rome, NY. – 198p.
7. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. - М.: ООО «Надежность». 2015.– 430с.