

## КОСМОС И ИНФОРМАТИКА

# Полимодельное прогнозирование надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов в условиях неопределенности информации о неблагоприятных воздействиях среды

**Polymodel reliability prediction for on-board equipment of spacecrafts under conditions of ambiguity of information concerning adverse environmental effects**

**ДОРОХОВ / DOROKHOV A.**

**Александр Николаевич**

(alex\_dorokhov@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского), доцент кафедры.

г. Санкт-Петербург

**МИРОНОВ / MIRONOV E.**

**Евгений Андреевич**

(john682@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А.Ф. Можайского, доцент кафедры.

г. Санкт-Петербург

**ПЛАТОНОВ / PLATONOV S.**

**Сергей Александрович**

(platonova123@mail.ru)

ВКА им. А.Ф. Можайского, заместитель начальника специального факультета – начальник учебной части.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** прогнозирование технического состояния – prediction of technical condition; прогнозная ситуация – forward situation; база моделей – model base; база знаний – knowledge base; полимодельный комплекс – polymodel complex.

В статье рассмотрены комплексы методического обеспечения оценивания технического состояния элементов и подсистем бортовой аппаратуры космических аппаратов, расчета, анализа и прогнозирования показателей их надежности и живучести на основе анализа значений телеметрируемых параметров на этапе наземных испытаний и орбитального полета. Обоснована структура комплекса алгоритмов анализа и прогнозирования показателей надежности и живучести бортовой аппаратуры с учетом характеристик фактической прогнозной ситуации. Предложена структура полимодельного комплекса алгоритмов и методик оценивания технического состояния элементов и подсистем бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов, расчета, анализа и прогнозирования показателей надежности и живучести бортовой аппаратуры.

This article deals with systems of methodological support for technical assessment of spacecraft on-board equipment elements and subsystems, as well as calculation, analysis, and prediction of their reliability and durability indicators based on the analysis of values of telemetered parameters at the ground testing and orbital flight stages. The structure of the algorithm system for analysis and prediction of reliability and durability indicators of on-board equipment with account to characteristics of the actual prediction case is explained and substantiated. The structure of the polymodel algorithm system and technical assessment methods for small mass dimensional spacecraft on-board equipment elements and subsystems, as well as calculation, analysis, and prediction of the on-board equipment reliability and durability indicators is proposed.

В статье рассматривается полимодельный подход к прогнозированию показателей надежности и живучести бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА) в условиях неопределенности внешней среды, сущность которого заключается в применении адаптивной процедуры выбора конкретной прогнозной модели из базы моделей с учетом характеристик фактической прогнозной ситуации и опыта специалистов – экспертов в области прогнозирования, formalизованного в соответствующей базе знаний.

Кроме того, предлагаются границы области работоспособности БА КА описывать нечеткими множествами, функции принадлежности которых оцениваются на основе формализованного представления опыта экспертов с помощью нечетких лингвистических шкал. Это позволит учесть при прогнозировании надежности и живучести априорную информацию о степени влияния факторов неблагоприятных воздействий на БА КА.

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ

Эффективность применения космических аппаратов различного целевого назначения во многом зависит от уровня надежности и живучести их бортовой аппаратуры. Контролировать состояние бортовых систем КА на этапах наземных испытаний и орбитального полета можно только на основе получения и обработки значений телеметрируемых параметров. В настоящее время в основу современных аппаратно-программных комплексов обработки результатов телеметрического контроля положен принцип мономодельного анализа, когда различные параметры обрабатываются с применением одной модели. Кроме того, границы полей допусков (ГПД) на параметры технического состояния (ТС) БА КА обычно задаются постоянными величинами, определяемыми по принципу наихудшего сочетания неблагоприятных факторов условий эксплуатации.

Недостатками существующего подхода являются: недостаточная универсальность базового математического обеспечения, основанного на применении одной модели, приводящая к росту методической погрешности прогнозирования ТС на широком классе процессов изменения ТС элементов и подсистем БА КА в условиях неопределенности воздействия внешней среды; недостаточная проработка вопросов обоснования значений границ полей допусков параметров ТС элементов и подсистем БА КА для ситуаций воздействия на КА естественных и преднамеренных факторов с уровнями, превышающими среднестатистические (т.е. при прогнозировании живучести).

### ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАДИЦИОННОГО МОНОМОДЕЛЬНОГО ПОДХОДА

Наиболее общая теоретическая постановка задачи оценивания технического состояния элементов и подсистем БА КА, расчета, анализа и прогнозирования показателей надежности и живучести БА КА [1, 2] в традиционной формулировке заключается (см. рис. 1) в следующем [3].

Состояние БА КА характеризуется с помощью вектора телеметрируемых параметров технического состояния, описываемых в общем случае случайными функциями:

$$\hat{X}_{\langle n \rangle}(t) = \langle \hat{x}_1(t), \hat{x}_2(t), \dots, \hat{x}_i(t), \dots, \hat{x}_n(t) \rangle, \quad (1)$$

причем все функции в этом векторе зависимы или хотя бы коррелированы (имеют случайную линейную зависимость), так как отражают работу одного и того же объекта. Случайные функции в общем случае могут быть как стационарными, так и нестационарными, монотонными или немонотонными [4].

Допустимые пределы изменения  $X_{\langle n \rangle}(t)$  снизу

$$X_{\text{н}}(t) = \langle x_{\text{н}}^{(1)}(t), x_{\text{н}}^{(2)}(t), \dots, x_{\text{н}}^{(i)}(t), \dots, x_{\text{н}}^{(n)}(t) \rangle, \quad (2)$$

и сверху

$$X_{\text{в}}(t) = \langle x_{\text{в}}^{(1)}(t), x_{\text{в}}^{(2)}(t), \dots, x_{\text{в}}^{(i)}(t), \dots, x_{\text{в}}^{(n)}(t) \rangle \quad (3)$$

в общем случае описываются векторами случайных функций [5].

Выход хотя бы одного из параметров за допустимые пределы приводит к параметрическому отказу объекта. Отличие задач оценивания надежности и живучести состоит в различном характере допусков. В первом случае допуска задаются для нормальных условий эксплуатации, во втором – для отличающихся от нормальных.

Задача прогнозирования значений показателей параметрической надежности и живучести состоит в отыскании вероятности

$$P_{\text{п}}(t) = \text{вер}[X_{\text{н}}(t) < X_{\langle n \rangle}(t) < X_{\text{в}}(t)] \quad (4)$$

того, что на интервале  $[0, t_{\text{прогн}}]$  ни одна из реализаций  $x_i(t)$  случайных функций  $x_i(t)$  не выйдет за реализации  $x_{\text{н}}^{(i)}(t)$ ,  $x_{\text{в}}^{(i)}(t)$  случайных функций  $x_i^{(i)}(t)$ ,  $x_{\text{а}}^{(i)}(t)$ ,  $i=1, n$ .

Показатели надежности и живучести при этом рассчитываются по формулам [3]:

– для средней наработка до отказа

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} P_{\text{п}}(t) dt; \quad (5)$$

# КОСМОС И ИНФОРМАТИКА

– для гамма-процентной наработки

$$t_\gamma = t \mid P_n(t) = \gamma / 100. \quad (6)$$

Для решения задач (5), (6) необходимо знать прогноз плотности вероятности

$f[\hat{x}_1(t), \hat{x}_2(t), \dots, \hat{x}_i(t), \dots, \hat{x}_n(t)]$  вектора  $X_{\langle n \rangle}(t)$  случайных функций. Выражение для вероятности (4) в данном случае можно записать в следующем виде:

$$P_n(t) = \int \cdots \int_{D(t)} f[x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)] dx_1 dx_2 \dots dx_i \dots dx_n, \quad (7)$$

где  $D(t)$  – область работоспособных состояний объекта, определяемая векторными случайными функциями  $\hat{x}_n(\tau)$  и  $\hat{x}_b(\tau)$  для всех  $\tau \in [0, t]$ .

Решение задачи в представленном выше общем виде на практике затруднено. Причиной этого

является сложность вычислений по формуле (7), связанная с громоздкими расчётомами многомерных интегралов. Кроме того, для осуществления расчётов с использованием выражения (7) необходимо знание законов совместного распределения функций  $\hat{x}_i(\tau)$ ,  $\hat{x}_n^{(i)}(\tau)$  и  $\hat{x}_b^{(i)}(\tau)$  в каждый момент времени  $\tau \in [0, t]$ . В большинстве случаев затруднительно определить конкретные характеристики законов совместного распределения данных функций из-за отсутствия необходимых статистических данных.

Задача прогнозирования параметрической надежности и долговечности в рассматриваемой постановке состоит в выявлении тренда; моделировании его с применением некоторой модели; экстраполяции тенденции на некоторый интервал в будущем; построении функции  $f(t)$  плотности распределения наработок до отказа и последующем расчёте значений показателей надежности или живучести (см. рис. 2). Составляющая помех

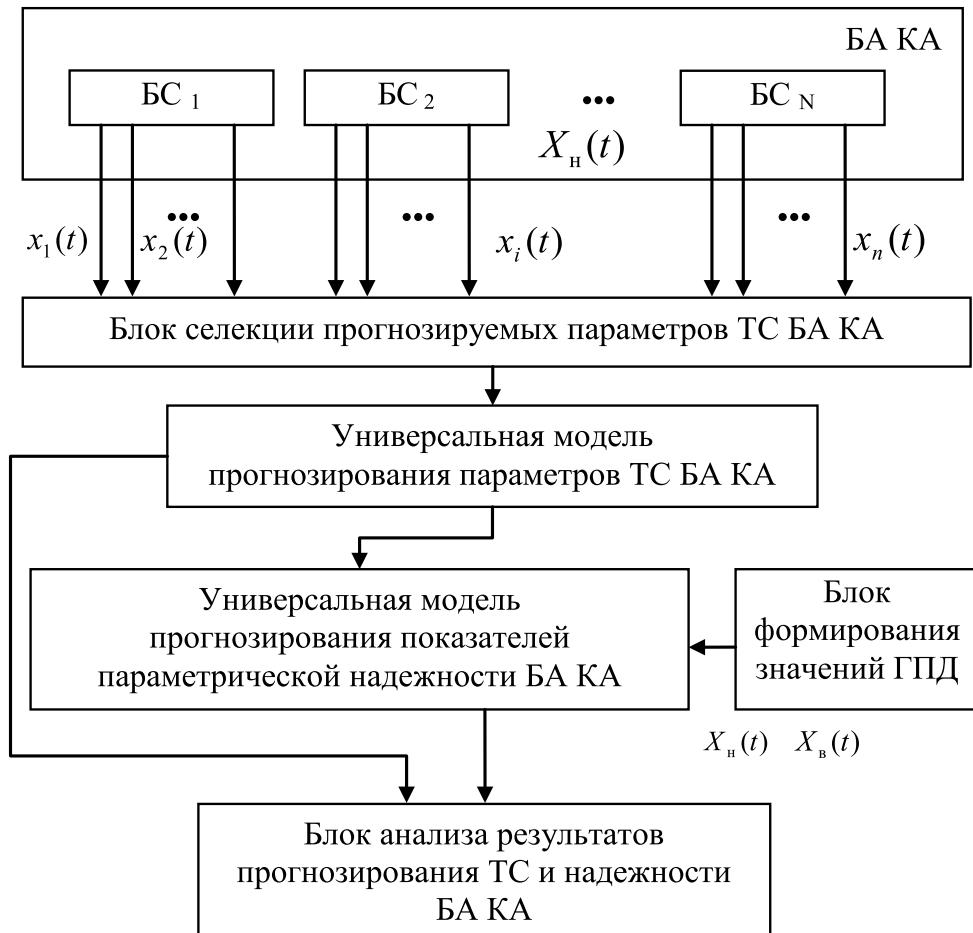
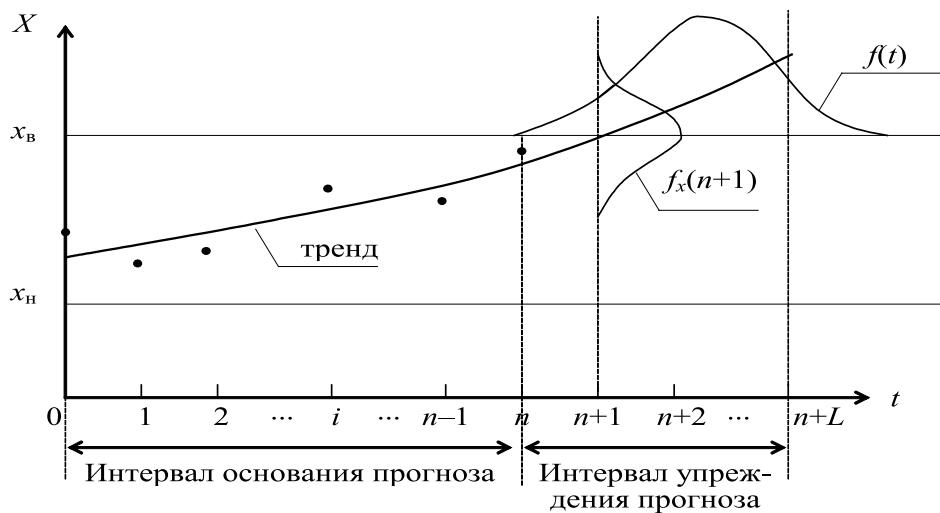


Рис. 1. Мономодельный подход к оцениванию технического состояния элементов и подсистем БА КА, расчету, анализу и прогнозированию показателей надежности и живучести БА КА



**Рис. 2.** Схема параметрического прогнозирования показателей надежности и живучести при упрощенном мономодельном подходе

должна быть при этом устранена и не принимать участие в формировании значений экстраполирующей функции.

Главным недостатком мономодельного подхода к решению задачи оценивания технического состояния элементов и подсистем БА КА в условиях неопределенности внешней среды является ограниченная возможность учета многообразия БА маломассогабаритных космических аппаратов (МКА), с одной стороны, и многообразия условий, в которых осуществляется прогнозирование телеметрируемых параметров БА МКА, с другой стороны, что приводит к возрастанию усредненной на множестве прогнозов методической составляющей погрешности моделирования изменения параметров БА МКА во времени и связанным с этим снижением точности и достоверности прогнозов значений показателей надежности и живучести.

#### ОБОСНОВАНИЕ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Многообразие БА МКА и условий прогнозирования ТС БА МКА порождает многовариантность прогнозных ситуаций [6]. Особенностью реального процесса прогнозирования ТС БА МКА в условиях неопределенности внешней среды является принципиальная нестабильность прогнозной ситуации. Под условиями прогнозирования параметров ТС БА МКА будем понимать совокупность факторов, определяющих количество и качество доступной исходной априорной и апостериорной информации об изменении ТС БА МКА в процессе эксплуатации, а также цель

получения прогноза и предъявляемые требования к точности и достоверности прогнозирования.

Следовательно, в зависимости от конкретной прогнозной ситуации будут существенно отличаться начальные условия, определяющие требования и ограничения к применяемому методу прогнозирования ТС БА МКА.

Исходя из этого, методология прогнозирования ТС БА МКА должна базироваться на следующих основополагающих принципах [7]: наиболее полном учёте физических особенностей построения и функционирования БА МКА в целом; наиболее полном учёте индивидуальных особенностей изменения ТС БА МКА; адаптивном учёте изменения количества и качества используемых при прогнозировании исходных данных; автоматизации основных процедур построения прогнозирующих моделей и получения результатов расчётов.

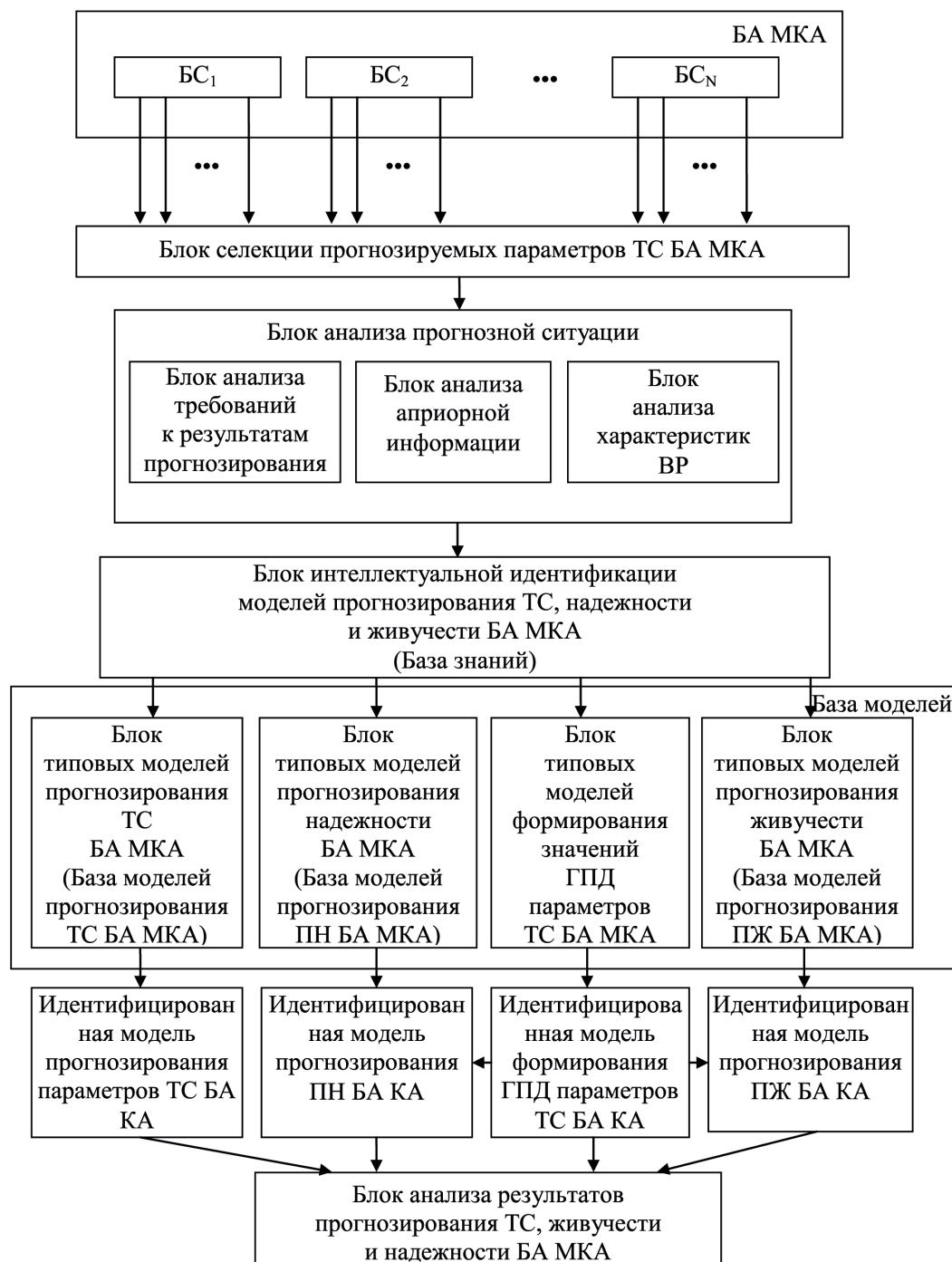
Эффективное решение задачи прогнозирования ТС БА МКА при описанных выше условиях возможно только на основе полимодельного (многомодельного) подхода. Особенности реализации такого подхода поясняет рис. 3.

#### ПРЕДЛАГАЕМАЯ СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ И МЕТОДИК

Как показал анализ [8], недостатками существующего подхода к оцениванию параметров ТС элементов и подсистем БА МКА и прогнозированию показателей надежности и живучести БА МКА в условиях неопределенности внешней среды являются:

- недостаточная универсальность базового математического обеспечения, основанного на

# КОСМОС И ИНФОРМАТИКА



**Рис. 3.** Полимодельный подход к оцениванию технического состояния элементов и подсистем БА КА, расчету, анализу и прогнозированию показателей надежности и живучести БА КА

применении мономодельного подхода, приводящая к росту методической погрешности прогнозирования ТС на реальном классе процессов изменения ТС элементов и подсистем БА МКА;

– недостаточная проработка вопросов обоснования значений границ полей допусков параметров ТС элементов и подсистем БА МКА для ситуаций воздействия на КА естественных и преднамеренных факторов с уровнями, превышающими среднестатистические (т.е. при прогнозировании живучести).

В этой ситуации необходима разработка алгоритмов и методик, реализующих полимодельный подход к оцениванию параметров ТС элементов и подсистем БА МКА и прогнозированию показателей надежности и живучести БА МКА в следующем составе:

1. Методика формирования базы моделей оценивания параметров ТС элементов и подси-

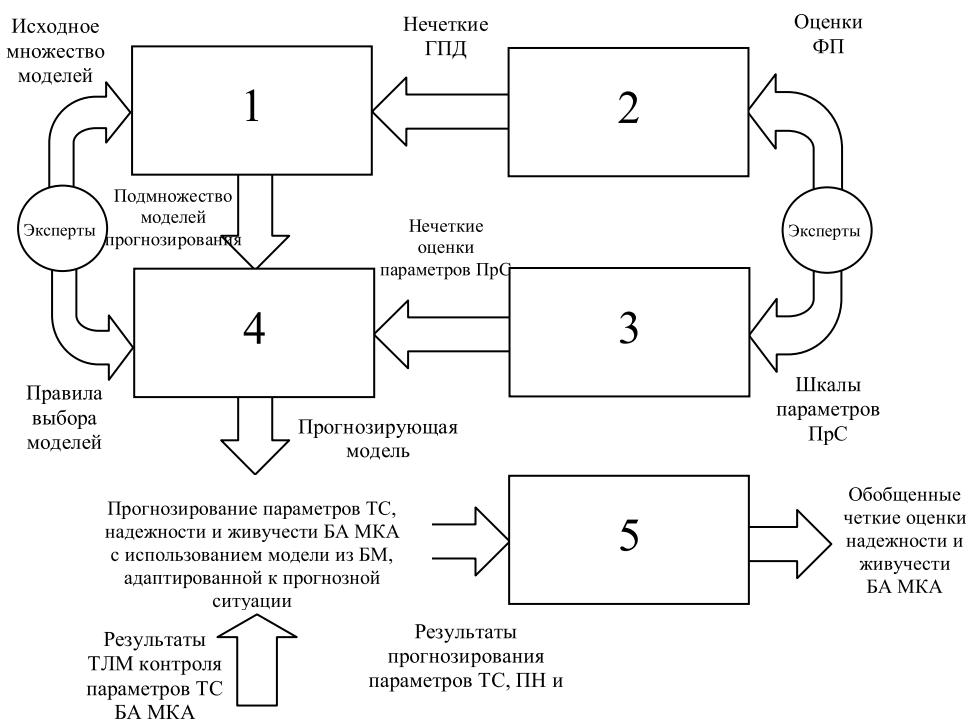
стем БА МКА и прогнозирования показателей надежности и живучести БА МКА на основе анализа значений телеметрируемых параметров на этапе наземных испытаний и орбитального полета.

2. Алгоритм определения значений границ поля допуска параметров ТС элементов и подсистем БА МКА с учетом возможных воздействий неблагоприятных факторов внешней среды.

3. Алгоритм идентификации параметров прогнозной ситуации.

4. Методика адаптивного выбора модели прогнозирования показателей параметрической надежности и живучести БА МКА из базы моделей на основе интеллектуальной базы знаний.

5. Алгоритм проверки выполнения требований к надежности и живучести БА МКА при нечетком задании границ поля допуска параметров ТС БА МКА.



**Рис. 4.** Структура разрабатываемого комплекса алгоритмов и методик оценивания технического состояния элементов и подсистем БА МКА, расчета, анализа и прогнозирования показателей надежности и живучести БА МКА на основе анализа значений телеметрируемых параметров на этапе наземных испытаний и орбитального полета

(1 – Методика формирования базы моделей оценивания параметров ТС элементов и подсистем БА МКА и прогнозирования показателей надежности и живучести БА МКА на основе анализа значений телеметрируемых параметров на этапе наземных испытаний и орбитального полета; 2 – Алгоритм определения значений границ поля допуска параметров ТС элементов и подсистем БА МКА с учетом возможных воздействий неблагоприятных факторов внешней среды; 3 – Алгоритм идентификации параметров прогнозной ситуации; 4 – Методика адаптивного выбора модели прогнозирования показателей параметрической надежности и живучести БА МКА из базы моделей на основе интеллектуальной базы знаний; 5 – Алгоритм проверки выполнения требований к надежности и живучести БА МКА при нечетком задании границ поля допуска параметров ТС БА МКА).

## КОСМОС И ИНФОРМАТИКА

Структура разрабатываемого комплекса алгоритмов и методик оценивания технического состояния элементов и подсистем БА МКА, расчета, анализа и прогнозирования показателей надежности [9] и живучести БА МКА в условиях неопределенности внешней среды на основе анализа значений телеметрируемых параметров на этапе наземных испытаний и орбитального полета приведена на рис. 4.

Реализация предложенного полимодельного подхода к обработке результатов телеметрического контроля параметров ТС БА МКА, как ожидается, должна привести к следующим положительным последствиям:

- повышению точности прогнозирования параметров ТС БА МКА в условиях неопределенности внешней среды, за счет снижения методической составляющей погрешности прогноза;
- возможности автоматизации процедуры выбора типа прогнозирующей модели в условиях нестабильности прогнозной ситуации;
- возможности учета влияния факторов неблагоприятных воздействий на БА МКА в условиях неполноты информации о составе и характеристиках неблагоприятных воздействий;
- возможности реализации процедуры контроля показателей надежности и живучести БА МКА при их нечетком оценивании.

### Литература

1. Козеев В.А. Прогнозирование состояния бортовых систем летательных аппаратов. – МО СССР, 1981. – 92 с.
2. Баженов, В.И. Моделирование основных характеристик и процессов функционирования космических аппаратов / В.И. Баженов, М.И. Осин, Ю.В. Захаров. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
3. Васильев, В.В. Прогнозирование надёжности и эффективности радиоэлектронных устройств. – М.: Сов. радио, 1970. – 336 с.
4. Теория прогнозирования и принятия решений / под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высшая школа, 1977. – 384 с.
5. Абрамов, О.В., Розенбаум, А.Н. Прогнозирование состояния технических систем. – М.: Наука, 1990. – 126 с.
6. Миронов, Е.А. Решение задачи идентификации математической модели объекта прогнозирования в условиях неопределенности [Электронный ресурс] / Е.А. Миронов, С.А. Платонов // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2014. – №4. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/118-14029>, свободный. – Загл. с экрана.
7. Ломакин, М.И. Многомодельная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности космических средств / М.И. Ломакин, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова // Измерительная техника. – 2014. – № 1. – С. 8–12.
8. Лоскутов, А.И. Интеллектуальная информационно-диагностическая система оценивания технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов при подготовке их к запуску / А.И. Лоскутов, С.С. Патраков, О.Л. Шестопалова // Информационно-управляющие системы. – 2014. – №1 (57).– С. 18–24.
9. Обеспечение надежности сложных технических систем : учебник / А.Н. Дорохов [и др.].– СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 352 с.