

Использование системного подхода к решению проблемных вопросов функционирования автоматизированного комплекса программ баллистико-навигационного обеспечения полетов КА ГНСС

В. В. Бетанов¹, В. К. Ларин²

¹д. т. н., проф., ²к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: betanov_vv@spacecorp.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные положения системного подхода к исследованию проблемных вопросов, возникающих в прикладных системах обработки информации. Принято за основу положение, что исследуемые системы имеют иерархическую структуру, объединяющую в целое определенное количество взаимосвязанных частей. Поэтому решение проблемы для анализируемой системы должно заключаться в выявлении несоответствия нормальной работе одной или нескольких частей, находящихся на одном или разных уровнях иерархии и определения метода решения в зависимости от структурированности проблемы. В рамках системного подхода предложена пошаговая технология в виде последовательных этапов решения. В качестве примера использования предлагаемой технологии проанализирована работа автоматического комплекса программ баллистико-навигационного обеспечения полетов КА ГНСС. В результате установлены составные части комплекса, содержащие вероятные ошибки, нарушающие нормальное функционирование. Определены методы их устранения. Сделан вывод о целесообразности использования системного подхода в виде предлагаемой технологической схемы для анализа работы аппаратно-программных объектов обработки информации в космической отрасли.

Ключевые слова: системный подход, проблема, система, предметная область

Using a Systematic Approach to Solving the Problematic Issues of Functioning of the Automated Complex of Programs for Ballistic and Navigational Support of GNSS Spacecraft Missions

V. V. Betanov¹, V. K. Larin²

¹doctor of engineering science, professor, ²candidate of engineering science

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: betanov_vv@spacecorp.ru

Abstract. The article describes the general provisions of the systematic approach to the study of the problems arising in the application systems for data processing. A thesis that the investigated systems have a hierarchical structure combining a certain amount of counterparts is taken as a basis. Therefore, the solution for the system under analysis should be in identifying the inconsistencies between the normal operation being on the same or different hierarchy levels and defining the method of solution depending on the problem structure. A step-by-step technology in the form of successive stages of solution is proposed in the frames of a systematic approach. A work of the automated complex of programs for ballistic and navigational support of GNSS spacecraft missions is given as an example of usage of the proposed technology. As a result, the component parts of the complex containing probable errors that disturb normal functioning were detected. Moreover, the methods for their elimination are defined. Conclusions are drawn about the practicability of using a systematic approach in the form of the proposed technological scheme for the analysis of work of the hardware and software objects for data processing in the space industry.

Key words: system approach, issue, system, subject area

Введение

Автоматизированный комплекс программ баллистико-навигационного обеспечения (АКП БНО) управления космических аппаратов (КА) представляет собой сложную техническую систему, функционирование которой связано с использованием при штатной работе следующих видов обеспечения: математического, программного, информационного, технического и других. Каждый вид обеспечения — это подсистема, состоящая из группы взаимосвязанных элементов. Бесперебойная работа элементов всех подсистем обеспечивает своевременное и качественное решение задач комплекса.

Эксплуатация АКП БНО показала, что в ряде случаев в силу различных причин происходит нарушение нормальной работы комплекса, выражающееся, как правило, либо в отсутствии решения, либо в получении решения с недопустимой точностью. Производимый оперативный анализ таких ситуаций дает возможность установить лишь факт существования проблемы, но не причин ее возникновения.

В статье предлагается обобщенная технология решения проблемных вопросов подобного рода. Дается описание примера использования технологии для выявления возможных причин аномальной работы АКП БНО и предложены методы их устранения. Предполагается, что процедура использования обобщенной технологии к разрешению таких ситуаций носит итеративный характер.

1. Обобщенная технология решения проблем

Определим центральные понятия, используемые в данной статье: системный подход, проблема, система и предметная область, необходимые для логического обоснования предлагаемой технологии решения проблемных вопросов [1–3].

Под системным подходом в работе понимается подход к исследованию объекта (проблемы, явления, процесса) как к системе, в которой выделены элементы, внутренние и внешние связи, наиболее существенным образом влияющие на исследуемые результаты его функционирования, а цели каждого

из элементов определены исходя из общего предназначения объекта. В свою очередь, под проблемой — иерархически упорядоченная совокупность вопросов, характеризующих разницу между действительным и желаемым состоянием объекта.

Согласно классификации по степени структурированности все проблемы подразделяются на три класса:

- хорошо структурированные (*well-structured*), или количественно выраженные проблемы, которые поддаются математической формализации и решаются с использованием формальных методов;
- неструктурированные (*unstructured*), или качественно выраженные проблемы, которые описываются лишь на содержательном уровне и решаются с использованием неформальных процедур;
- слабоструктурированные (*ill-structured*), или смешанные проблемы, которые содержат как качественные элементы, так и малоизвестные, неопределенные стороны, которые имеют тенденцию доминировать.

Далее, предметная область — часть реального мира, рассматриваемая в пределах данного контекста. Под контекстом понимается область исследования, которая является объектом некоторой деятельности.

Наконец, под системой (от др.-греч. *σύστημα* — целое, составленное из частей; соединение) понимается **множество элементов**, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенную целостность, единство, по своим свойствам превосходящее свойства входящих элементов.

При этом под решением проблемы понимается устранение несоответствия между желаемым и действительным состоянием объекта. В дальнейших рассуждениях будем использовать понятие «проблемы» применительно к оценке функционирования системы в определенной предметной области (ПО).

Предварительно заметим, что система (как и проблема) имеет иерархическую структуру, объединяющую в целое определенное количество

взаимосвязанных частей. Поэтому решение проблемы для некоторой функционирующей системы может заключаться (в общем случае) в устранении выявленного несоответствия работы одной или нескольких частей, находящихся на одном или разных уровнях иерархии системы.

В случае нахождения решения не для всех частей системы, определенных как «зараженные», необходимо произвести оценку степени решения проблемы.

В качестве обобщенной технологии решения проблемы для некоторой системы можно рассмотреть следующую пошаговую последовательность этапов решения.

1-й шаг. Разложение системы на наиболее крупные функционально завершенные фрагменты первого уровня.

2-й шаг. Проведение анализа возможного несоответствия нормальному функционированию выделенных фрагментов (выявление «зараженных» частей системы).

3-й шаг. Формулировка проблемы для «зараженных» частей.

4-й шаг. Определение степени структурированности проблем работы «зараженных» частей.

5-й шаг. Выбор метода решения проблемы для каждой «зараженной» части системы (частная проблема).

6-й шаг. Нахождение решения частных проблем для «зараженных» частей системы.

7-й шаг. Разложение оставшихся частей с нерешенными проблемами функционирования на элементы следующего уровня иерархии системы (менее крупные) и проведение действий по шагам 1–6.

Разложения заканчиваются в двух случаях:

- дальнейшее разложение системы по функциональному признаку невозможно;
- найдены решения частных проблем для всех частей последнего уровня.

8-й шаг. Оценка решения проблемы функционирования системы по совокупному числу решенных частных проблем на уровнях иерархического разложения.

Основные методы системного анализа, используемые при решении проблемных вопросов

В табл. 1 приведен перечень основных методов системного анализа, используемых для решения рассматриваемых проблем [1–3].

Таблица 1. Перечень основных методов системного анализа

Наименование методов	Интегральная характеристика
Аналитические методы Статистические методы Теоретико-множественные методы Лингвистические методы Семиотические методы Графические методы	Формальные методы — методы формализованного представления систем
Морфологический подход Методы структуризации: «дерева целей», «прогнозного графа» и др. Методы Дельфи Методы экспертных оценок Методы «сценариев» Методы мозгового штурма (атаки)	Эвристические методы — методы, направленные на активизацию использования интуиции и опыта специалистов

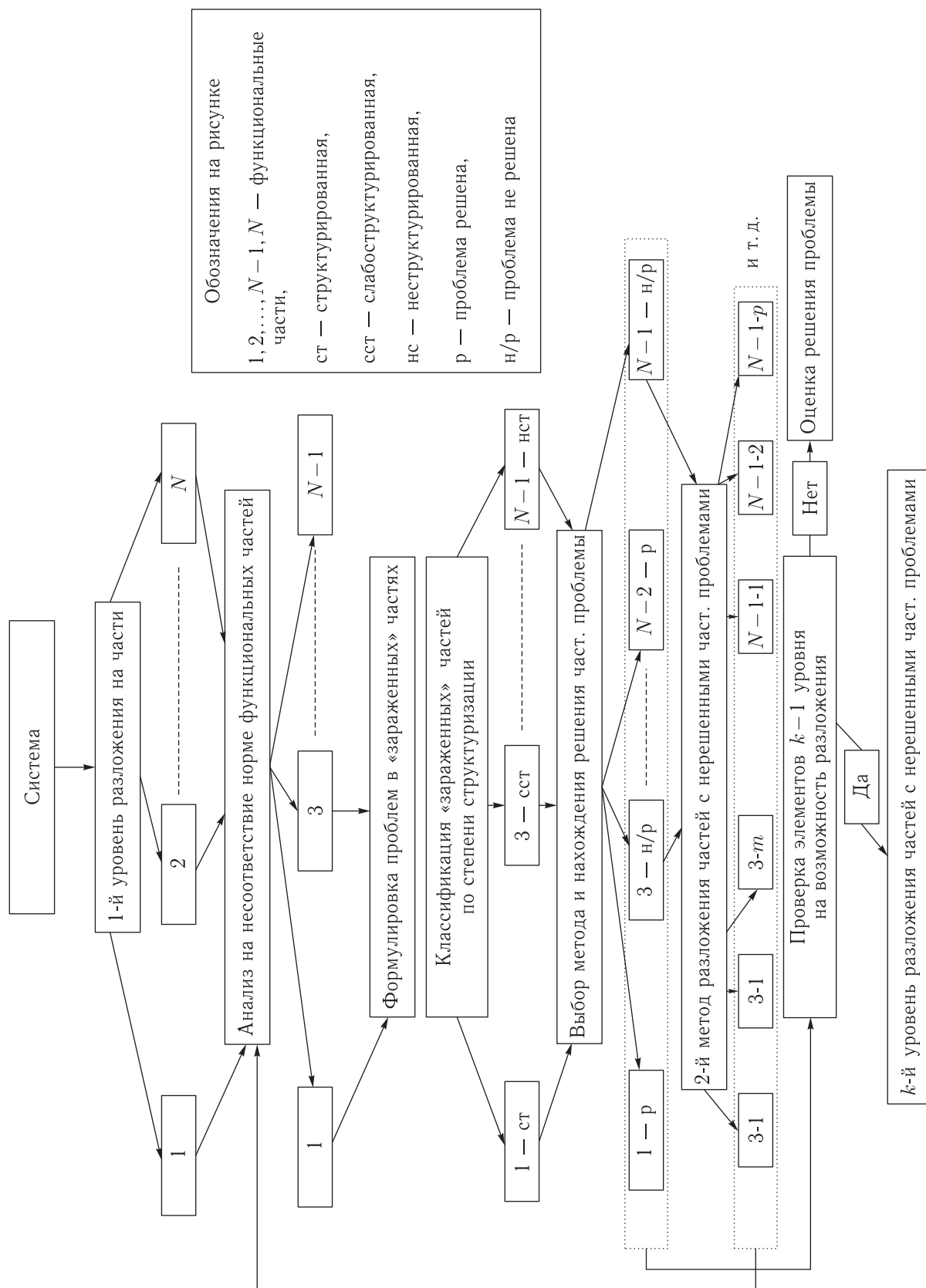
В большинстве случаев формальные методы применяются для решения структурированных проблем, эвристические методы — для слабоструктурированных и неструктурированных проблем.

Из формальных методов наиболее часто используются аналитические и статистические методы, из эвристических методов — метод экспертных оценок, включая экспертные системы, морфологический подход и метод мозгового штурма.

Далее приводятся рекомендации по последовательности этапов решения проблемы в зависимости от степени ее структуризации.

Структурированные проблемы

- 1) Формулировка цели.
- 2) Построение математической модели описания системы в виде совокупности элементов, связанных между собой определенными отношениями.



Рисунок

- 3) Анализ модели на предмет отыскания «зараженных» частей, выбор метода решения.
- 4) Оценка решения проблемы.

Неструктурированные проблемы

- 1) Формулировка цели.
- 2) Анализ системы на предмет отыскания «зараженных» частей, выбор метода решения.
- 3) Формирование группы экспертов и использование метода мозгового штурма.
- 4) Использование метода экспертных оценок, включая разработку экспертной системы (с учетом результатов п. 3).
- 5) Оценка решения проблемы.

Слабоструктурированные проблемы

- 1) Формулировка цели.
- 2) Формирование альтернатив достижения цели; оценка этих альтернатив с помощью соответствующих критериев и выбор предпочтительной альтернативы.
- 3) Анализ системы на предмет отыскания «зараженных» частей, выбор методов решения (формальных или эвристических) в зависимости от степени их структурированности.
- 4) Отыскание решения частных проблем.
- 5) Оценка решения общей проблемы системы (с учетом результатов п. 4).

На рисунке приведена технологическая схема поиска решения проблемы в виде структурной схемы пошаговой технологии.

2. Использование обобщенной технологии для исследования работы АКП БНО

В качестве примера можно рассмотреть проблему неудовлетворительной работы АКП БНО, выражающуюся в недопустимом отклонении рассчитанных по измерениям текущих навигационных параметров характеристик движения КА от эталонных значений (финальные данные, приводимые в каталогах КА ГНСС).

Предварительно уточним предметную область, к которой относится объект исследования. В данном случае она будет состоять из следующих основных видов обеспечения: математического (алгоритмического), программного, технического и информационного. Указанные виды обеспечения могут служить функциональными частями первого уровня разложения.

Проведение анализа возможного несоответствия нормальному функционированию выделенных частей показал, что поскольку решение было найдено, то функционировали все виды обеспечения. Однако если бы проблема заключалась в выходе из строя технического обеспечения (отсутствие электропитания на входе сервера, механическое повреждение его деталей и т. д.), то это привело бы к отсутствию решения. Но поскольку решение имело место, то техническую часть из дальнейшего рассмотрения можно исключить. Таким образом, к «зараженным» частям можно отнести алгоритмическую, программную и информационную части.

При этом формулировка проблемы остается прежней — неудовлетворительная точность полученного решения.

Все три оставшиеся части, содержащие возможные ошибки (проблемы), приводящие к существующему положению, имеют структурированный (алгоритмическая часть, по определению) и слабоструктурированный в целом (программная и информационная части) характер.

Вероятное существование проблемы в алгоритмической части приводит к необходимости ее дальнейшего разложения на составные части, а именно на модуль предварительной обработки траекторных измерений (ПРО) и модуль определения параметров движения КА (решение краевой задачи — КЗ).

Выходными данными ПРО является таблица сеансов измерений (траекторные измерения одного КА для одного измерительного пункта на заданном интервале времени). Количество сеансов будет определяться произведением одновременно измеряемых типов параметров на число измерительных пунктов. На этапе ПРО производится фильтрация (в том числе отбраковка) измерений текущих навигационных параметров по заданным критериям. При этом процент отбракованных данных должен составлять определенную часть от всех измерений,

принятых в обработку и обеспечивающих сходимость решения задачи. При невыполнении этого условия измерительной информации, полученной КЗ для дальнейших расчетов, будет недостаточно, что может привести к недопустимым ошибкам в уточняемых параметрах движения КА.

Таким образом, одной из причин существующей проблемы может быть отсутствие условия необходимого минимума числа сеансов, а также числа измерений в сеансе, наличие которого в значительной степени объясняло бы неудовлетворительное решение задачи.

Модуль решения КЗ математически значительно сложнее модуля ПРО. В него входят: модель движения КА, матрицы частных производных от измерений по начальным условиям, статистические методы обработки измерений (например, метод наименьших квадратов — МНК), методы интегрирования дифференциальных уравнений движения, формирование и решение систем большого числа линейных уравнений, интерполяционные и аппроксимирующие полиномы и т. д. Традиционные условия решения подобных задач хорошо апробированы и, как правило, не вызывают затруднений. Вместе с тем наиболее уязвимым местом при решении КЗ можно считать возможность плохой обусловленности матриц, используемых при решении нормальных уравнений для вычисления поправок к параметрам орбиты и другим уточняемым параметрам. Для МНК это матрица Грама. Целесообразным выходом из этого положения можно считать введение на этом этапе расчетов критерия степени обусловленности матриц.

Проблема в информационной части может быть сформулирована в двух вариантах:

- отсутствие всей или части необходимой информации;
- наличие ошибок в полученной информации для данного сеанса обработки.

Для установления причин возникновения проблемы необходимо разложение информационной части на следующий уровень иерархии, а именно источники информации: центральная база данных (ЦБД) и внутренний FTP-сервер системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ).

Поскольку суть проблемы касается непосредственно информации, необходимо перейти на следующий уровень — информационный — распределение информации по источникам (табл. 2).

Таблица 2. Источники используемых данных

Источник информации	Вид информации
ЦБД	Навигационные сообщения: оперативные данные, альманах Справочные данные: логическая шкала сил, глобальные константы, технические характеристики сигналов, параметры возмущающих сил (например, ПВЗ), КА
Внутренний FTP-сервер	Rinex-файлы

Проанализируем вероятность наличия ошибок в информации, содержащейся в источниках. Так, для ЦБД:

– навигационные сообщения (оперативная информация и альманах) находятся в суперкадре, который поступает от КА наземным станциям каждые 2,5 мин. При приеме автоматически производится проверка на достоверность. Эти данные используются всеми Центрами — участниками ГНСС. При этом ошибки маловероятны;

– справочные данные записываются в базу единожды, тщательно проверяются, используются при каждом сеансе определения орбит КА ГНСС, что позволяет считать (по аналогии с навигационными сообщениями) маловероятным наличие в них погрешностей;

– параметры вращения Земли — «считанные» с внешнего специального сервера данные о ПВЗ, представляемые в виде годовых массивов, содержащих суточные тройки информации (t , x_p , y_p — время и координаты полюсов), используемые всеми участниками ГНСС. Ошибки практически исключены.

Rinex-файлы заданного типа. Их содержание включает:

1. Файл данных наблюдений: время, псевдодальность, фаза, доплеровские поправки (ФДН).
2. Файл навигационных сообщений (ФНС).
3. Файл метеорологических данных (ФМД).
4. Файл навигационных сообщений ГЛОНАСС.

5. Файл навигационных сообщений GEO.

6. Файл данных часов спутников и приемников (ФДЧ).

7. Файл широкозонной корректирующей информации SBAS (ФШКИ).

Из представленных файлов рассмотрим ФДН, данные которого используются в сеансе обработки информации и могут содержать ошибки. При этом ФДН включает: время, псевдодальность, фазу, доплеровские поправки.

Возможны три варианта наличия частных проблем:

1. Отсутствие информации по какому либо из параметров.

2. Наличие некачественных данных.

3. Наличие неполного объема данных.

В первом варианте можно допустить отсутствие доплеровских измерений, в этом случае не будет «решения по скоростям», но решение задачи будет получено. Отсутствие информации о времени или псевдодальности, а также данных относительно фазы обуславливает невозможность определения уточненных параметров орбиты по какому-либо из КА.

Во втором варианте необходимо отделить некачественную информацию от качественной. Основным критерием такого разделения является угол места γ , под которым происходил прием сигнала от КА в зоне видимости измерительного пункта (ИП). Экспериментально было установлено, что при $\gamma \leq 70$ информация, полученная ИП, — некачественная (большой уровень шума за счет атмосферы). Соблюдение этого условия при загрузке информации в базу на первом этапе обработки ПРО позволит удалить некачественную информацию до начала расчетов и обеспечить необходимую точность.

В третьем варианте неполный объем информации обусловлен либо прохождением трассы по «краям» зон видимости ИП, либо удалением части информации по условию $\gamma \leq 70$. Наиболее радикальным выходом из этого положения является удаление данного КА из варианта обработки.

Программное обеспечение, как и алгоритмическое, целесообразно разложить на две основные программы комплекса: предварительную обработку

измерений и определение параметров орбиты (следующий уровень).

Частные проблемы программ формулируются следующим образом: ПРО — формирование и запись в архив недостаточного количества качественных сеансов измерений по каждому КА; КЗ — определение параметров орбит КА с неудовлетворительной точностью.

Примем в качестве допустимого варианта, что алгоритмы ПРО и КЗ, трансформированные в коды программ, идентичны и не имеют ошибок. Учитывая, что программы представляют собой совокупность взаимосвязанных модулей, внутри которых производятся как аналитические расчеты, так и различные преобразования информации, необходимо продолжить «разложение» программного обеспечения (ПО) АКП на программные модули. Первый уровень для ПО: общие модули автоматизированного комплекса программ (АКП), ПРО, КЗ. Продолжим разложение частей ПО на следующем нижнем уровне.

Общие модули АКП:

- настройки режимов работы и конфигурации комплекса (формирование файла настроек);
- программные модули взаимодействия с базой данных (БД);
- программные модули взаимодействия с файловыми архивами.

Предварительная обработка измерительной информации (ПРО):

- формирование сеансов измерений текущих навигационных параметров (ИТНП);
- обработка и фильтрация сеансов ИТНП;
- формирование наборов базовых линий;
- формирование разностных измерений;
- фильтрация сеансов разностных измерений;
- определение местоположения (ОМП) по кодовым измерениям дальности;
- статистическая оценка результатов ОМП.

Оперативное уточнение параметров орбит навигационных КА (КЗ):

- решение краевой задачи;

- уточнение частотно-временных поправок (ЧВП);
- формирование архива соответствующих файлов.

Практика эксплуатации ПО АКП показала, что одной из основных проблем определения параметров орбит навигационных КА является явление «скачков» фазовых измерений (обработка и фильтрация сеансов измерений в ПРО), отражающих нарушение приема и потерю счета целого числа фазовых циклов в фазоизмерительном устройстве.

В ПРО реализована проверка фазовых измерений с помощью методов, основанных на использовании комбинаций Мельбуерна–Вуббена и Geometry-Free [2]. Однако указанные методы не решают до конца проблемы «скачков» и в случае попадания таких измерений в модуль КЗ приводят к решениям с неудовлетворительной точностью. Выходом из положения является разработка экспертно-диагностической системы (ЭДС) для конкретного случая. В настоящее время разработан прототип ЭДС для оценки модуля местоположения (модуль ПРО) [4–6], который может послужить технологическим образцом для разработки ЭДС — «скачки».

В остальных модулях возможны случайные ошибки, допущенные при написании программ. Их выявление производится на этапе тестирования комплекса как обязательной процедуры, проводимой до использования АКП на практике.

Заключение

Рассмотренный подход к решению проблем сбоев в работе АКП БНО позволяет сделать следующие выводы.

1. Для анализа и решения проблем, возникающих при работе АКП БНО, рекомендуется рассматривать комплекс как систему с иерархической структурой.
2. Предлагается обобщенная технология решения проблем работы функционально сложных

систем в виде восьми этапов, основными элементами которых являются составные части, полученные разложением системы по функциональному признаку. Определена степень их структурированности и предложено решение частных проблем для «зараженных» частей с использованием методов системного анализа.

3. Рассмотрены возможные варианты проблем в работе АКП БНО, уточнены составные части комплекса, содержащие вероятные ошибки в «зараженных» модулях, и предложены методы их исправления.

4. Предлагаемая технологическая схема решения проблем в рамках системного подхода может найти применение при оценке работы аппаратно-программных систем космической отрасли.

Список литературы

1. Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ: Учебник. Томск: Издательство Томского университета, 2004.
2. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы, определение местоположения и их применение в геодезии. М.: Картгеоцентр, 2004.
3. Методика системного анализа. Реферат. Мгт. 2014.
4. Бетанов В. В., Ларин В. К., Позяева З. А. База знаний для программного модуля определения местоположения приемника. Сб. статей № 6 «ИТМиВТ им. С. А. Лебедева РАН», 2015.
5. Бетанов В. В., Ларин В. К., Позяева З. А. К вопросу анализа причин возникновения сбоев в аппаратно-программном комплексе уточнения эфемеридно-временной информации ГНСС // Научно-технический журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2014, т. 1, вып. 1. С. 55–60.
6. Бетанов В. В., Ларин В. К., Позяева З. А. Прототип экспертной диагностической системы поиска и коррекции скачков в безразностных фазовых измерениях // Научно-технический журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2014, т. 1, вып. 3. С. 73–81.