



Анализ текущего состояния процесса контроля при управлении полётом космических аппаратов.

Н.В. Румянцев, инженер второй категории

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв,
Московская область*

Аннотация: В статье проведен анализ текущего состояния процесса контроля при управлении полётом космических аппаратов (КА). Представлено состояние технологий контроля, применяемых в настоящее время при управлении полётом современных КА. Выявлены недостатки процесса контроля, которые усиливаются в процессе развития космической техники. Для устранения недостатков предлагается использование новых интеллектуальных методов, которые за счет повышения автоматизации процесса контроля полета КА повысят надежность и оперативность управления. Рассмотрены перспективные методы повышения надежности контроля КА с использованием технологий искусственного интеллекта, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС). Проведен анализ научных публикаций, посвященных применению ИНС в космической технике, приведены примеры применения ИНС в задачах управления полётом, диагностики и обработки данных. Рассмотрены преимущества и ограничения использования нейронных сетей в космической технике.

Ключевые слова: управление полётом, контроль, анализ состояния, телеметрическая информация, нейронные сети.

Введение

Современные космические аппараты (КА) — это сложные технические устройства, представляющие собой комплекс взаимосвязанных, бортовых систем (БС), обеспечивающих выполнение плана полета (ПП) в экстремальных условиях космического пространства. Контроль состояния КА осуществляется при выполнении ПП и представляет собой сложный, многоуровневый процесс, который охватывают весь период эксплуатации КА на орбите. Сложность контроля КА напрямую зависит от объема данных, описывающих состояние КА. Современные КА генерируют несколько тысяч телеметрических параметров (ТМП).

Необходимым условием реализации процесса контроля, является анализ телеметрической информации (ТМИ), передаваемой с борта КА. ТМИ служит наиболее достоверным и оперативным источником данных,



предоставляющим сведения о текущем состоянии КА, а также позволяющим анализировать его предысторию и контролировать выполнение ПП. На основе ТМИ также возможно частичное прогнозирование будущего состояния КА и планирование его полета на будущее.

Текущее состояние процесса контроля при управлении полетом КА

Управление полётом КА является важнейшей составляющей процесса лётных испытаний и эксплуатации космической техники [1]. Управление полётом КА — это сложный технологический цикл, объединяющий последовательность взаимосвязанных этапов, которые реализуются в строгой временной логике. Этот процесс включает: планирование, реализация ПП, контроль состояния КА, анализ состояния КА, принятие решений.

Планирование начинается с определения основных целей полета и проектных параметров БС. Включает в себя разработку номинального ПП, общего плана сопровождения и детального ПП. Реализация плана включает выполнение последовательности полетных операций. Контроль контроля состояния КА с использованием ТМИ. Проводится анализ большого объема данных, содержащих несколько тысяч разнородных ТМП, для обеспечения оперативного получения и обработки данных и своевременного выявления отклонений и аномалий. Анализ результатов включает интерпретацию полученных данных контроля для оценки текущего состояния КА, диагностику возможных неисправностей и прогнозирование их развития, а также учет располагаемых ресурсов КА и определение необходимости корректирующих действий. Принятие решений основывается на результатах анализа: принимаются решения по управлению полетом, вносятся корректировки в ПП, выполняются технические операции по восстановлению работоспособности БС, а также принимаются меры по обеспечению безопасности и продолжению выполнения ПП. Укрупненная

структура процесса управления полетом с учетом логической последовательности действий представлена на рис. 1.

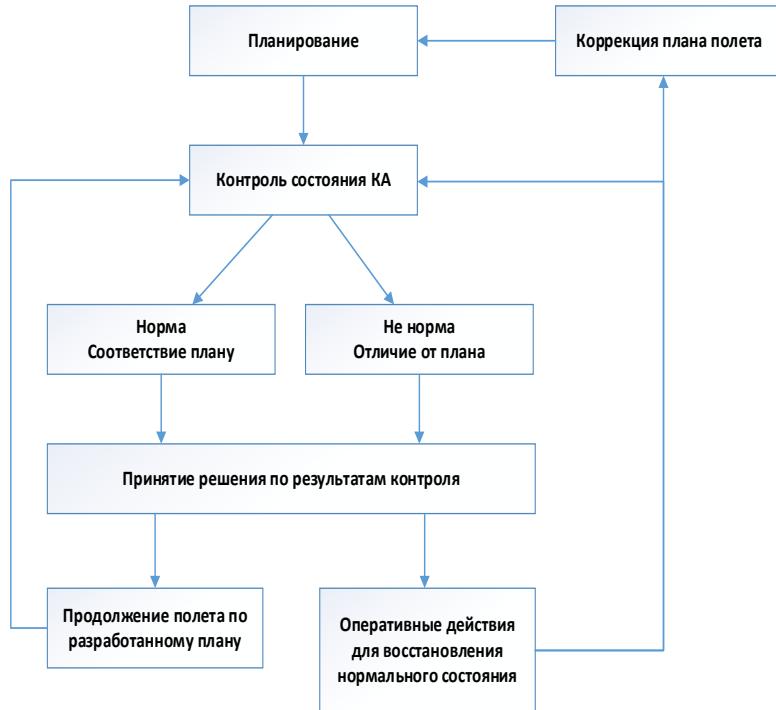


Рис. 1. – Схема процесса управления космическим полетом.

В общем виде задачу контроля математически можно описать как:

Пусть дан набор ТМП $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ где каждый x_n -это значение

ТМП параметра в данный момент времени, а n -количество ТМП.

Пусть для каждого параметра x_n (например, температура, давление и тд.) заданы нормативные значения тогда:

$$\text{КА [норма]} = \begin{cases} W_{\text{тми}} \geq W_{\text{пред}} \\ min_n \leq x_n(t) \leq max_n \\ \{S_{1\text{исп}}, S_{2\text{исп}}, \dots, S_{j\text{исп}}\} \in \{S_{1\text{пл}}, S_{2\text{пл}}, \dots, S_{j\text{пл}}\} \end{cases} \quad \text{иначе [не норма].}$$

Где:

$W_{\text{тми}}$ и $W_{\text{пред}}$ -объём ТМИ (выраженный в некотором количестве значений ТМП, полученных от КА) и минимально необходимый для контроля состояния КА;



\min_n и \max_n – минимальное и максимальное допустимое значение параметра x_n указанный в документации;

$S_{1\text{исп}}, S_{1\text{пл}}$ – исполняемые и запланированные режимы работы.

На данный момент контроль полёта КА осуществляется человеко-машинной системой, состоящей из наземного комплекса управления (НКУ), бортового комплекса управления (БКУ) КА, и персонала центра управления полетом (ЦУП).

В НКУ анализ ТМИ осуществляется методом «допускового контроля», предполагающим сравнение текущих значений ТМП с предельными или плановыми величинами, зафиксированными в эксплуатационной документации и специализированными алгоритмами автоматизированного контроля, опирающиеся на связи ТМП. Данные методы, несмотря на их практическую ценность, обладают рядом недостатков.

Одним из ключевых недостатков является сложность анализа взаимосвязанных ТМП КА, чьё взаимовлияние требует комплексных методов оценки отклонений. Например, даже при сохранении всех ТМП в допустимых пределах, их комбинация может в некоторый момент времени принимать значения, отличные от обычно фиксируемых, что можно расценивать как аномалию, создавая предпосылки для будущих нештатных ситуаций (НШС). Подобные НШС, связанные со скрытыми взаимосвязями ТМП, могут быть своевременно выявлены только специалистами управления полётом, обладающими глубоким пониманием работы КА, как сложной системы.

Кроме того, современные методы анализа ТМИ фиксируют НШС лишь в момент превышения предельных значений ТМП, что сокращает временной резерв для реагирования.



Время контроля можно определить, как время от момента возникновения аномалии до момента выдачи управляющего воздействия (УВ).

Время контроля можно представить, как:

$$T_k = t_p + t_{\text{пер}} + t_{\text{прр}}$$

Где:

t_p - время, которое требуется оператору ЦУП чтобы заметить аномалию и принять решение по выдаче УВ;

$t_{\text{прр}}$ - время, которое требуется для приема и обработки ТМИ;

$t_{\text{пер}}$ - время, которое требуется для передачи УВ;

В ходе штатного функционирования КА на орбите наблюдаются продолжительные временные интервалы (от нескольких часов до суток), когда основные ТМП КА остаются без изменений. Такие периоды создают значительные когнитивные нагрузки на операторов. При этом даже незначительные отклонения значений ТМП, которые в нормальном состоянии были бы сразу обнаружены, могут остаться незамеченными в течение длительного периода времени. В такие моменты ключевое значение приобретает человеческий фактор и уровень подготовки отдельного специалиста.

Также человеческий фактор ограничивает способность одного специалиста анализировать весь объем ТМИ, поступающих с КА. Поток информации значительно превышает индивидуальные возможности человека, поэтому для эффективного контроля требуется участие нескольких специалистов. В практике работы групп анализа прогнозирование основывается на оценочных расчетах, которые экстраполируют результаты анализа прошлых периодов на будущее. Однако такой подход не лишен



недостатков и может приводить к значительным погрешностям в прогнозах из-за внешнего влияния космической среды и возникновения аномалий.

Опыт, накопленный при управлении полетом КА, позволяет сформулировать основные недостатки средств и технологий контроля состояния КА при выполнении ПП, которыми в настоящее время являются:

- минимальная автоматизация процедур анализа технического состояния КА и его составных частей, включая поиск аномалий, как предвестников потенциальных НШС;
- ограниченная автоматизация контроля выполнения полётных операций и исполняемых режимов составных частей КА;
- наличие операций анализа, выполняемых специалистом управления в ручном режиме без привлечения средств автоматизации;
- отсутствие средств автоматизированного прогнозирования технического состояния КА и деградации его характеристик при дальнейшей эксплуатации;
- отсутствие средств для автоматизированного учёта ресурсов КА [2].

Для устранения данных недостатков и повышения оперативности и надежности контроля состояния КА необходимо использовать новые методы и технологии для контроля, которые должны помогать избавиться от множества рутинных и повторяющихся операций, которые могут быть выполнены машинами. Система контроля должна обеспечивать анализ больших объемов информации и мониторинг многочисленных ТМП. В научных публикациях [3-4] перспективными считаются интеллектуализированные системы контроля использующие формальные подходы и методы искусственного интеллекта (ИИ).

Интеллектуализированные системы контроля состояния КА



Искусственные нейронные сети (ИНС), машинное обучение и другие методы ИИ активно применяются для анализа данных, управления системами и принятия решений в реальном времени [5-6]. ИНС, благодаря своей способности обучаться на больших объемах данных, играют важную роль в автоматизации процессов контроля состояния КА. Они способны автоматически выявлять отклонения от штатных режимов работы, классифицировать их по степени критичности и даже прогнозировать потенциальные НШС. Это особенно важно для КА, где своевременное обнаружение аномалий может предотвратить серьёзные последствия, такие как потеря связи, отказ БС или даже полная потеря КА.

Использование ИНС позволяет перейти от традиционного ручного анализа ТМИ к автоматизированному анализу, что позволит значительно повысить оперативность и надежность контроля. Работа ИНС на борту КА позволит уменьшить время выдачи УВ до времени работы ИНС, которое не превышает нескольких десятых секунды. В составе НКУ ИНС могут применяться как инструмент для создания систем помощи принятия решений, что позволит увеличить надежность управления полетам КА.

В научных публикациях [7-9] представлены различные варианты построения эффективных бортовых и наземных средств контроля и диагностики состояния систем КА, рассмотрены как общие принципы построения НКУ и БКУ, так и методы реализации интеллектуальных функций.

Далее рассмотрим наиболее актуальные работы в области контроля состояния КА. В работе [7] обнаружение неисправности сведено к задаче распознавания двух классов «исправно», «неисправно», проведен сравнительный анализ качества контроля с применением персептрона и вероятностной ИНС. Показано, что ИНС достаточно уверенно разделяет ситуацию на два класса и может быть использована для решения задачи

анализа работы БС КА. Авторы рассматривают задачу обнаружения отклонений в работе БС КА как задачу распознавания. При этом метод состоит из трех шагов: построение таблиц прецедентов, обучение ИНС и распознавание.

В работе [8] рассматривается подход к решению задачи контроля ТМП КА с использованием нейросетевых методов. Авторы уделяют основное внимание вопросам организации мониторинга и обработки потоков ТМИ, в том числе процедурам аппроксимации и интерполяции экспериментальных данных. Предлагаемая схема контроля носит многоэтапный характер: сначала телеметрические данные сохраняются в базе данных, затем по ним формируется модель текущего состояния контролируемой БС, результаты моделирования также фиксируются в БД, после чего выполняется сопоставление реальных и расчётных показаний датчиков, анализируется состояние БС КА и принимается решение о её исправности. На заключительном этапе оператору передаётся сформированная информация о возможных неисправностях.

В работе [9] предлагается вариант ИНС, ориентированной на обнаружение и изоляцию неисправностей КА. Описанная авторами диагностическая схема, в частности, применяется для оценки состояния импульсных плазменных двигателей, входящих в состав подсистемы управления движением КА. Отмечается, что многоуровневый метод диагностики демонстрирует высокую точность и хорошую сходимость, а также может использоваться как для контроля системы управления отдельного КА, так и для мониторинга нескольких КА одновременно.

В работе [10] представлена двухуровневая методика поиска неисправностей в группе КА, основанная на использовании динамических ИНС. На нижнем уровне иерархии динамическая ИНС обучается по абсолютным измерениям состояния каждого КА и выполняет оценку его



исправности в индивидуальном порядке. Однако часть неисправностей носит более сложный, “коллективный” характер и требует анализа на верхнем уровне. Для этих целей применяется динамический многослойный персепtron, обрабатывающий обобщённую информацию по совокупности КА. Такая двухуровневая архитектура системы контроля и диагностики позволяет не только надёжно обнаруживать и изолировать (классифицировать) неисправности, но и снижать вероятность ошибок на разных уровнях управления.

Сопоставление результатов, представленных в работах [6-8], позволяет сделать вывод, что при построении перспективных систем управления полётом КА необходимо комплексно решать ряд взаимосвязанных задач. К ним относятся: задача контроля, трактуемая как выделение информативных признаков в ТМИ с последующим обнаружением и классификацией аномалий; повышение точности и полноты распознавания нештатных ситуаций; улучшение оперативности, качества и надёжности управления в части контроля состояния БС КА. Важным направлением является также повышение производительности труда операторов, снижение влияния «человеческого фактора» на итоговые решения. Анализ динамики процессов в ходе управления полётом КА показывает, что разработка систем анализа ТМИ, основанных на современных технологиях обработки данных и методах интеллектуального анализа, является как перспективной, так и практически значимой задачей.

Выводы

Анализ текущего состояния процесса анализа при управлении полётом показывает, что существующие методы анализа имеют ряд недостатков: минимальная автоматизация процедур анализа, наличие операций анализа, выполняемых специалистом управления в ручном режиме, отсутствие средств автоматизированного прогнозирования технического состояния КА.



Это приводит к необходимости задействовать значительные ресурсы высококвалифицированных специалистов, требует проведения обширной подготовительной работы и имеет явные недостатки в плане оперативности. Эффективность данного подхода в значительной мере зависит от уровня квалификации специалиста управления полетом.

На современном уровне развития ИТ-технологий одним из перспективных методов автоматизации и повышения надежности управления полетом КА является возможность применения ИНС. ИНС обладают рядом преимуществ, таких как способность к обучению на больших объемах данных, высокая адаптивность к изменяющимся условиям, возможность выявления сложных зависимостей и прогнозирования аномалий. Использование ИНС позволяет перейти от традиционного ручного контроля ТМИ-КА к автоматизированному контролю, что позволит значительно повысить оперативность и надежность контроля полетом КА.

Анализ научных публикаций, в которых рассматривают применение ИНС при управлении полетом КА, позволяет сделать вывод о перспективности и практической значимости разработки систем анализа информации, использующих современные технологии обработки данных и методы интеллектуального анализа.

Литература

1. Фраленко В.П., Емельянова Ю.Г., Шишкун О.Г., Лисейцев А. Е. «Интеллектуальная поддержка процессов контроля и диагностики космических подсистем». Программные системы: теория и приложения, 2019, 10:4(43), с. 25–75.
2. Румянцев Н.В., Соловьев С.В., Павлов Д.В. Интеллектуализированная система контроля, диагностики и прогнозирования состояния бортовых

- систем космических аппаратов // Труды МАИ. 2024 № 136 URL: [trudymai.ru/published.php? ID=180688](http://trudymai.ru/published.php?ID=180688)
3. Соловьев В.А., Любинский В.Е., Жук Е.И. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов. «Пилотируемые полеты в космос» 2011. - №2(2) С. 30 – 46.
 4. Абрамов Н.С., Заднепровский В.Ф., Талалаев А.А., Фраленко В.П. Применение искусственных нейронных сетей в задачах контроля и диагностики подсистем космических аппаратов // Современные проблемы науки и образования, № 3, 2014. URL: science-education.ru/pdf/2014/3/296.pdf (дата обращения: 10.10.2025).
 5. Маршаков Д.В., Цветкова О.Л., Айдинян А.Р. Нейросетевая идентификация динамики манипулятора // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/504
 6. Пучков Е.В. Разработка системы поддержки принятия решений для управления кредитными рисками банка // Инженерный вестник Дона, 2011, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/377
 7. Емельянова Ю.Г., Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М. Нейросетевой метод обнаружения неисправностей в космических подсистемах. Труды международной конференции «Программные системы: теория и приложения». Т. 1 (май 2009, Переславль-Залесский), Изд-во «Университет города Переславля», Переславль-Залесский, 2009, с. 133–143.
 8. Емельянова Ю.Г., Константинов К.А., Погодин С.В., Талалаев А.А., Тищенко И.П., Фраленко В.П., Хачумов В.М. «Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата», Программные системы: теория и приложения, 2010, №1, с. 45–59.



9. Valdes A., Khorasani K., Liying M. “Dynamic neural network-based fault detection and isolation”, Advances in Neural Networks — ISNN 2009, Lecture Notes in Computer Science, vol. 5553, Springer, Berlin–Heidelberg, 2009, pp. 780–793, ISBN 978-3-642-01513-7.
10. Mousavi M.S. Neural network-based fault diagnosis of satellites formation flight, M.A. Sc. work, Concordia University, Canada, 2013, 241 pp.

References

1. Fralenko V.P., Emel'yanova Yu.G., Shishkin O.G., Lisejcev A. E. Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya, 2019, 10:4(43), pp. 25–75.
2. Rumyancev N.V., Solov'yov S.V., Pavlov D.V. Trudy MAI. 2024 № 136 URL: trudymai.ru/published.php?ID=180688
3. Solov'ev V.A., Lyubinskij V.E., Zhuk E.I. «Pilotiruemye polety v kosmos» 2011. №2(2) pp. 30 – 46.
4. Abramov N.S., Zadneprovskij V.F., Talalaev A.A., Fralenko V.P. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, № 3, 2014. URL: science-education.ru/pdf/2014/3/296.pdf (data obrashheniya: 10.10.2025).
5. Marshakov D.V., Cvetkova O.L., Ajdinyan A.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/504
6. Puchkov E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/377
7. Emel'yanova Yu.G., Talalaev A.A., Fralenko V.P., Xachumov V.M. Trudy mezhdunarodnoj konferencii «Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya».. 1 (maj 2009, Pereslavl'-Zalesskij), Izd-vo «Universitet goroda Pereslavlya», Pereslavl'-Zalesskij, 2009, pp. 133–143.
8. Emel'yanova Yu.G., Konstantinov K.A., Pogodin S.V., Talalaev A.A., Tishchenko I.P., Fralenko V.P., Xachumov V.M. Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya, 2010, №1, pp. 45–59.



9. Valdes A., Khorasani K., Liying M. Advances in Neural Networks — ISNN 2009, Lecture Notes in Computer Science, vol. 5553, Springer, Berlin–Heidelberg, 2009, pp. 780–793, ISBN 978-3-642-01513-7.
10. Mousavi M.S. M.A. Sc. work, Concordia University, Canada, 2013, 241 p.

Автор согласен на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 5.12.2025

Дата публикации: 8.01.2026