

# КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

## CONTROL AND TESTING AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS

УДК 629.7.01:519.24

doi:10.21685/2307-5538-2023-1-8

### МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЭТАПЕ ИХ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ

М. А. Белокопытов<sup>1</sup>, К. В. Ушанев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>hommer1990@mail.ru, <sup>2</sup>stan\_007@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются существующие и перспективные космические аппараты. Предметом исследования являются контроль технического состояния и диагностирование бортовой аппаратуры космических аппаратов. Целью работы является разработка модели интеллектуализированной системы контроля и диагностирования, применение которой позволит повысить достоверность определения технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов на этапе их испытаний и применения. *Материалы и методы.* При разработке модели интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов основное внимание уделено методу, основанному на машинном обучении, который позволяет строить прогнозные модели с использованием как ретроспективных, так и текущих данных, поступающих в реальном времени с измерительной аппаратуры и получать неочевидные на первый взгляд закономерности. *Результаты.* Предложен подход к повышению достоверности определения технического состояния за счет применения интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Интеллектуализированность данной системы определяется наличием математической, алгоритмической, программной и инструментальной составляющих интеллектуальной поддержки лиц, принимающих решения при управлении космическими аппаратами. *Выводы.* Разработанная модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов позволяет расширить возможности космического аппарата за счет реализации функций корректировки алгоритмов работы бортового и специального программного обеспечения на основании результатов машинного обучения и нейросетевой обработки телеизмерений, способствующих более достоверному определению технического состояния бортовой аппаратуры. Предложенную модель предлагается использовать на этапах испытания и применения космических аппаратов для повышения достоверности определения технического состояния бортовой аппаратуры и оперативности принятия мер по предотвращению возникновения нештатных ситуаций.

**Ключевые слова:** контроль, диагностирование, бортовая аппаратура, космический аппарат, испытания, нештатная ситуация, система поддержки принятия решений

**Для цитирования:** Белокопытов М. А., Ушанев К. В. Модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов на этапе их испытаний и применения // Изменение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 62–69. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-8

## THE MODEL OF AN INTELLECTUALIZED SYSTEM ON-BOARD MONITORING AND DIAGNOSTICS SPACECRAFT INSTRUMENTS AT THE STAGE OF THEIR TESTING AND APPLICATION

M.L. Belokopytov<sup>1</sup>, K.V. Ushanev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> hommer1990@mail.ru, <sup>2</sup> stan\_007@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The object of research is existing and prospective spacecraft. The subject of the study is the control of the technical condition and diagnostics of the onboard equipment of spacecraft. The aim of the work is to develop a model of an intelligent monitoring and diagnostics system, the use of which will increase the reliability of determining the technical condition of the onboard equipment of spacecraft at the stage of their testing and application. *Materials and methods.* When developing a model of an intelligent system for monitoring and diagnosing the onboard equipment of spacecraft, the main attention is paid to a method based on machine learning, which allows you to build predictive models using both retrospective and current data received in real time from measuring equipment and obtain patterns that are not obvious at first glance. *Results.* An approach is proposed to increase the reliability of determining the technical condition through the use of an intelligent system for monitoring and diagnosing the onboard equipment of spacecraft. The intellectualization of this system is determined by the presence of mathematical, algorithmic, software and instrumental components of intellectual support for decision makers in the management of spacecraft. *Conclusions.* The developed model of an intelligent system for monitoring and diagnosing the onboard equipment of spacecraft makes it possible to expand the capabilities of the spacecraft by implementing the functions of correcting the algorithms of the onboard and special software based on the results of machine learning and neural network processing of television measurements, contributing to a more reliable determination of the technical condition of the onboard equipment. The proposed model is proposed to be used at the stages of testing and application of spacecraft to increase the reliability of determining the technical condition of on-board equipment and the efficiency of taking measures to prevent the occurrence of emergency situations.

**Keywords:** monitoring, diagnostics, on-board equipment, spacecraft, tests, emergency situation, decision support system

**For citation:** Belokopytov M.L., Ushanev K.V. The model of an intellectualized system on-board monitoring and diagnostics spacecraft instruments at the stage of their testing and application. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):62–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-8

### *Введение*

В настоящее время в Российской Федерации с учетом действующих политических, экономических и научно-технических факторов активно ведутся работы, направленные на обеспечение научно-методической базы для подготовки предложений в федеральные и ведомственные целевые программы, способные вывести отечественную космонавтику из перманентного предкризисного состояния и гарантировать минимально эффективное решение задач космической деятельности России уже с 2020 г., с ее наращиванием до паритетных мировому уровню – в период до 2030 г.

Одной из основных проблем, затрудняющих развитие космонавтики в РФ, является низкая оперативность и достоверность решения задач оценки технического состояния (ТС) космических аппаратов (КА) и диагностирования бортовых систем (БС) космических аппаратов при контроле и испытаниях космических систем (КС).

Связано это прежде всего с возрастающим количеством различного рода отказов и неисправностей БС КА из-за проблем обеспечения их качества и надежности, длительных сроков проведения летных испытаний, тестового режима функционирования при одновременном выполнении задач по предназначению и низкого качества электронной компонентной базы (ЭКБ) отечественного производства.

### *Материалы и методы*

Анализ современных отечественных и зарубежных подходов и методов контроля ТС БС КА показал, что методы, основанные на интеллектуальном анализе относительно

больших массивов данных, позволяют извлекать из имеющихся массивов телеметрических параметров закономерности и зависимости, позволяющие строить прогнозные модели на основе статистических методов. Данные методы дают хорошие результаты для выявления отказов и идентификации их локальных эффектов.

Наиболее перспективными являются методы, основанные на машинном обучении, позволяющие строить прогнозные модели с использованием как ретроспективных, так и текущих данных, поступающих в реальном времени с измерительной аппаратуры, и получать неочевидные на первый взгляд закономерности. Способность к обучению дает возможность оперативно корректировать параметры моделей прогнозирования при изменяющихся условиях функционирования КА, значительно минимизируя «простои» использования КА по целевому назначению (ЦН).

Одним из таких походов, способствующих более достоверному определению ТС БА КА, на взгляд авторов, является разработка системы технического диагностирования, специальное математическое обеспечение которой на основе анализа прогнозных значений контролируемых телеметрических параметров позволит решить задачу локализации неисправностей и минимизации неопределенности их появления без выдачи дополнительных управляющих воздействий, а также оценить остаточный ресурс БС КА.

С целью реализации данного подхода разработана модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования БА КА на этапе испытаний и применения.

### *Результаты и обсуждение*

Модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования БА КА на этапе испытаний и применения, структурно-функциональная схема которой представлена на рис. 1, предполагает дооснащение текущей системы контроля и диагностирования БА КА, основанной на информационном взаимодействии между центром управления полетами (ЦУП), главным конструктором, специальным потребителем и самим КА системой определения диапазонов параметров БА и предупреждения нештатных ситуаций (СОДПП).

Основными компонентами СОДПП являются:

- подсистема определения допустимых диапазонов параметров БА (подсистема 1);
- подсистема прогнозирования значений параметров БА (подсистема 2);
- блок обработки результатов и формирования корректировок в алгоритмах работы бортового комплекса управления (БКУ);
- центр обработки данных (ЦОД).

В данной системе диагностирования БА КА для парирования НШС, возникающих на борту КА, объем циркулирующей информации, необходимой для достоверного определения ТС, определяется на этапе разработки КС [1].

Основной информационный обмен разделен на направления между: КА и ЦУП; ЦУП и специальным потребителем; ЦУП и главным конструктором. Анализ и оценка ТС БА осуществляются по полному или ограниченному (при локализации НШС) потоку телеметрической информации (ТМИ). Также в направлении «Борт–Земля» БКУ при выявлении НШС, основываясь на заложенных «жестких» алгоритмах, может передавать информацию оперативного контроля (ИОК), в которой содержится информация о БА, работающей с отклонениями от параметров, указанных в эксплуатационной документации (ЭД), и сигнал «Вызов НКУ», говорящий о необходимости съема ТМИ и анализе ТС за счет диагностирования БА КА [2].

Сектор анализа ЦУП КА по результатам обработки ТМИ и на основании инструкции по оценке работы БС формирует предложения в систему управления для выдачи управляющих воздействий на борт КА, исходя из требований инструкции по организации управления КА в полете при возникновении НШС. При отсутствии в первой инструкции предложений по парированию формируется уведомление в адрес главного конструктора – в первую очередь, а во вторую – рекламационный акт (сообщение о неисправности). Спустя продолжительный срок в ЦУП поступают рекомендации по управлению и в последующем акт исследования, раскрывающий причины возникновения НШС, способы парирования, меры, исключающие возможное повторение данных отказов аналогичной БА.

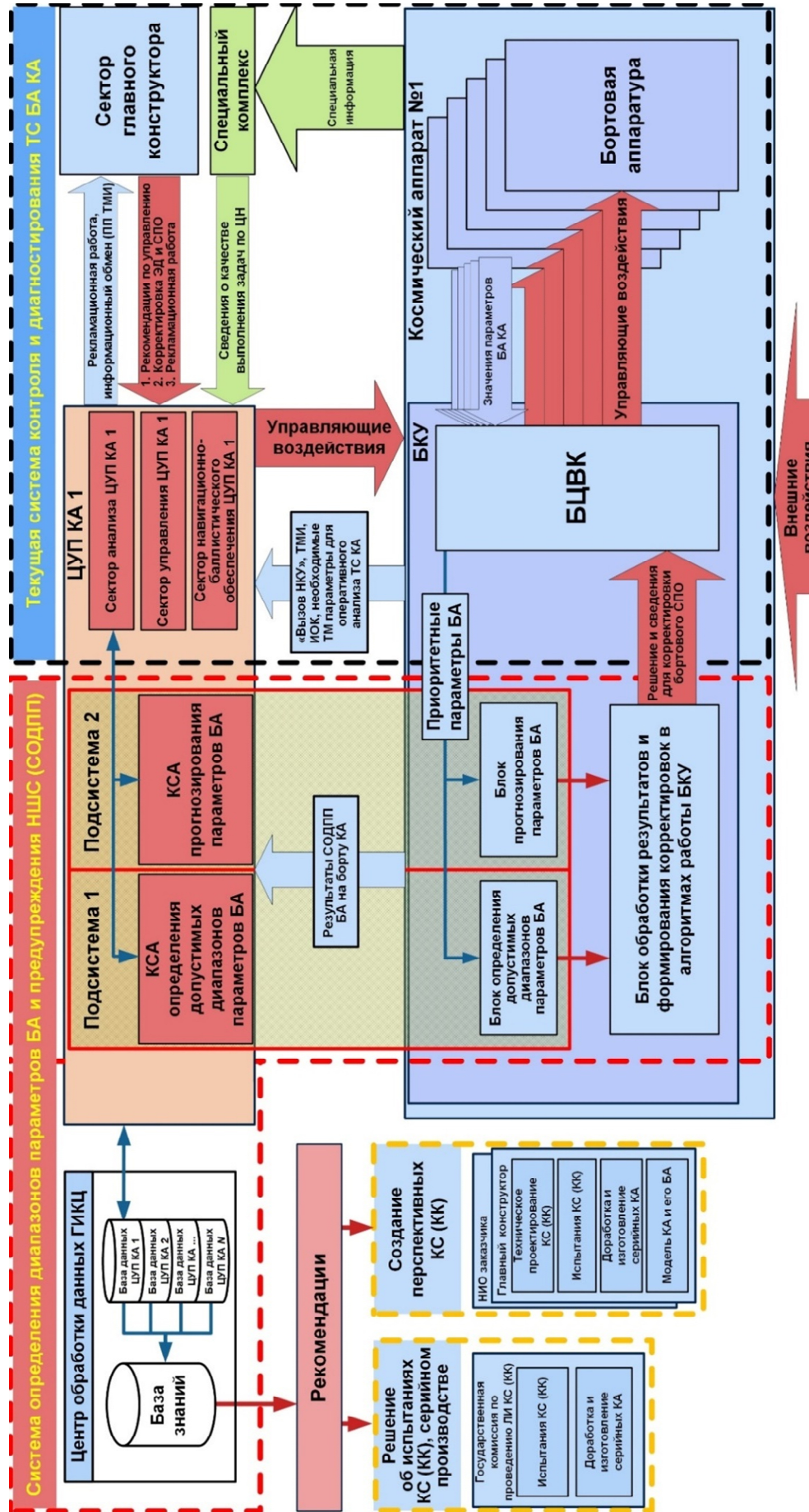


Рис. 1. Структурно-функциональная схема модели интеллектуализированной системы контроля и диагностирования ТС БА КА на этапе испытаний и применения

В итоге в текущей системе контроля и диагностирования БА КА поиск и устранение неисправностей определяется алгоритмами и рекомендациями главного конструктора. Оперативность  $O$  при приведении КА в готовность к выполнению задач по ЦН связана со временем выявления НШС и принятием мер по недопущению достижения предельного состояния и может быть представлена в виде функции<sup>1</sup>

$$O = f(t_{\text{поиск}}; Q_{\text{изм}}; t_{\text{упр}}; D_{\text{реш}}). \quad (1)$$

Показателями, влияющими на оперативность, являются:

- $t_{\text{поиск}}$  – время поиска причин возникновения НШС и анализа;
- $Q_{\text{изм}}$  – полнота проводимых измерений при локализации НШС;
- $t_{\text{упр}}$  – время, необходимое на выдачу необходимых управляющих воздействий на БА КА;
- $D_{\text{реш}}$  – достоверность сформированного управляющего воздействия.

На этапах испытания и применения принятие решений о ТС БА КА и его управлении зависит в основном от главного конструктора, поскольку зачастую ЭД не позволяет полностью парировать возникающие НШС, а в большинстве возникающих случаев предлагаемые меры в виде отключения большей части бортовых систем направлены на исключение достижения ими предельного состояния.

Накопление данных в СОДПП от момента выведения КА до его закрытия предлагается осуществлять в центре обработки данных (ЦОД). При этом значение параметров БА КА, полученных в ходе съема ТМИ, хранятся в базе данных соответствующего ЦУП КА, а методы и алгоритмы их анализа сведены в единую базу знаний. Все данные предоставляются при соответствующем запросе как в адрес ЦУП, так и для подготовки предложений в системе поддержки и принятия решений [3], в том числе и при выборе критически важных параметров для оперативного диагностирования НШС [4].

На подсистему определения допустимых диапазонов параметров БА возлагаются функции по сбору статистических данных со значениями определенных параметров БА, которые требуются для подтверждения летных характеристик БА КА или являются основополагающими при выполнении задач по ЦН (напряжение аккумуляторных батарей, их температура, давление и температура на определенных участках в системе терморегулирования, параметры излучений специальной аппаратуры и т.д.) в изменяющихся условиях работы. По мере накопления статистики на основе машинного обучения и алгоритмов сравнения производится определение рабочих диапазонов значений параметров БА, соблюдение которых позволит избежать воздействия критических нагрузок на отдельные элементы БА КА, подверженные ускоренному выходу из строя.

Таким образом производится сужение допусков значений параметров БА, руководствуясь которыми, осуществляется ее более «бережное» использование, заблаговременное отключение при выходе за уточненные границы диапазонов значений параметров с целью недопущения предельного состояния и работы в критических нагрузках. Также возможно расширение допусков в случаях, если при этом не будет ускорена выработка ресурса БА, тем самым увеличив продолжительность применения КА по ЦН в особых условиях.

Комплекс средств автоматизации (КСА) определения допустимых диапазонов параметров БА в ЦУП в отличие от одноименного блока на борту дополнительно анализирует результаты качества выполнения задач целевой аппаратурой КА, что позволяет классифицировать значения параметров БА КА и определить, какие из них при нахождении в разрешенных границах значений влияют на выполнение задач по ЦН. Помимо анализа данных по одному аппарату возможны расчеты параметров типовой БА, что позволит увеличить статистическую выборку и повысить точность вычислений.

В целом работа данной подсистемы позволит определить, насколько точно были заданы допустимые диапазоны значений параметров БА КА, подготовить данные для моделей КА и их БА, воссозданных на стендах главных конструкторов, на основании информации, полученной в реальных условиях орбитального полета КА.

На подсистему прогнозирования значений параметров БА возлагается функция по определению их возможных значений на заданный момент времени на основании накопленных

<sup>1</sup> ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

статистических данных со значениями определенных параметров БА. Применение данной системы возможно за счет использования нейронных сетей при условии реализации большой вычислительной мощности и позволяет:

- спрогнозировать данные для БКУ об отклонениях значений параметров БА относительно допустимых, тем самым предотвратить достижение критических нагрузок и запуска протоколов защитных отключений бортовых систем, приводящих к усложнению дальнейшей связи ЦУП с КА;

- повысить автономность функционирования КА путем увеличения периодичности проведения сеансов связи с НКУ.

КСА прогнозирования параметров БА КА в ЦУП отличается большими вычислительными возможностями, может работать с орбитальной группировкой КА и позволяет определить необходимость заблаговременного выхода на связь с КА для принятия необходимых мер по выдаче управляющих воздействий с целью парирования возникновения НШС, если такие меры не были приняты БКУ по результатам работы соответствующего блока на борту.

СОДПП предполагает реализацию возможности принятия решений БКУ для управления БА КА. Необходимость изменения алгоритмов принятия решений в зависимости от полученных результатов блоками прогнозирования и переопределения допустимых диапазонов параметров БА КА определяется в блоке обработки результатов и формирования корректировок в алгоритмах работы БКУ на борту КА на основании предоставленных исходных данных:

- допустимых диапазонов параметров БА КА;

- значений спрогнозированных параметров БА КА на заданный интервал времени.

БКУ на основе полученных сведений вносит корректировки в алгоритмы работы бортового программного обеспечения и руководствуется вновь полученными данными при управлении БА КА, параметры которой анализировались. Отдельными потоками в БКУ анализируется спрогнозированная информация. При необходимости принимаются меры, включая передачу сигнала «Вызов НКУ». Но в целом предполагается, что модель на борту КА будет обеспечивать его работу в автоматическом режиме.

В ЦУП функции данной системы распределены на КСА секторов анализа и управления. Для увеличения вероятности того, что предлагаемые меры, сформированные в виде управляющих воздействий на КА, приведут к желаемому результату, эксплуатирующий состав ЦУП осуществляет оценку последствий реализации операций парирования на основании ЭД, рекомендаций главного конструктора и экспертных знаний.

Совершенствованию работы СОДПП должно способствовать обобщение не только полученных в ходе анализа ТМИ данных, но и по результатам работы определения допустимых диапазонов и прогнозирования параметров БА КА. Их сбор осуществляется в ЦОД, из которого при обращении предоставляются необходимые статистические данные пользователям научно-испытательных и исследовательских подразделений для формирования базы знаний. В последующем выдаются рекомендации для:

- формирования предложений Государственной комиссии в решение Правительства РФ о проведении (завершении) испытаний КС, серийном производстве изделий;

- формирования предложений по созданию и обоснованию облика перспективных КС.

Таким образом, применение СОДПП позволяет представить оперативность при приведении КА к выполнению задач по ЦН (1) как функцию, зависящую от полноты полученных результатов и достаточности принятых мер (2):

$$O = f(Q_{\text{изм}}; D_{\text{реш}}), \quad (2)$$

в которой  $t_{\text{поиск}} \rightarrow \min, t_{\text{упр}} \rightarrow \min$ .

При этом стоит учесть, что прогнозирование позволяет принять заблаговременные меры по предотвращению возникновения НШС и прочих негативных последствий, для которых не будет необходимости в привлечении к огромной работе по восстановлению БА КА всех заинтересованных организаций, участвующих в проведении испытаний. Кроме того, выраженное свойство адаптивности системы позволяет противостоять внешним воздействиям техногенного и природного характера.

Интеллектуализированность системы в представленной модели определяется наличием математической, алгоритмической, программной и инструментальной составляющих интеллектуальной поддержки лиц, принимающих решения при управлении КА [5, 6].

Отдельно необходимо отметить, что СОДПП позволяет хранить сведения, которые будут учитываться при создании перспективных КС с заявленными характеристиками, которые будут не только отвечать современным требованиям к космическим разработкам иностранных государств, но и лидировать в отдельных направлениях.

### Заключение

Таким образом, внедрение описанной модели интеллектуализированной системы контроля и диагностирования БА КА на этапе испытаний и применение позволят расширить возможности КА за счет реализации функций корректировки алгоритмов работы бортового и специального программного обеспечения на основании результатов машинного обучения и нейросетевой обработки данных параметров БА, способствующих более достоверному определению ТС БА КА. Полученные результаты накапливаются в ЦОД, который при необходимости может сформировать достаточную статистическую выборку и обеспечить форсированное проведение испытаний в части подтверждения определенных тактико-технических характеристик.

С учетом современных тенденций построения ЦУП на базовых и специализированных комплексах средств автоматизации с возможностью общего использования серверно-коммуникационного оборудования с применением методов, основанных на допусковом контроле, определяемом ЭД, а также жестких решающих правилах оценки ТС БА КА, модель с предлагаемой системой диагностирования позволяет осуществлять интеллектуальный анализ текущих данных, а также хранящихся в общем ЦОД на основе высоконадежных кластеров баз данных.

Реализация предложенной модели позволит повысить оперативность и достоверность принятия решений при испытаниях и применении КА при корректировке диапазонов допустимых параметров БА КА и прогнозировании временных рядов.

### Список литературы

1. Иванов И. Г., Морозов С. В., Белокопытов М. Л. Повышение качества испытаний космических средств путем использования системы поддержки принятия решений на основе прецедентов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 121–130. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-15
2. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. Управление космическими полетами : учеб. пособие. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. Ч. 2. 434 с.
3. Гуляев М. А., Бондарева М. К., Иванов И. Г., Зубков Г. А. Моделирование использования баз данных о состояниях космических средств для автоматизированной системы управления эксплуатацией и испытаниями космических систем и комплексов // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. М. : ФГБНУ «Аналитический центр». 2021. С. 417–423.
4. Бондарева М. К., Гуляев М. А., Иванов И. Г. Методика выбора параметров бортовой аппаратуры космического аппарата для анализа интеллектуализированными системами // Проблемы обороноспособности и безопасности : сб. науч. тр. М. : ФГБНУ «Аналитический центр» Минобрнауки РФ, 2020. Вып. 22. С. 183–199.
5. Интеллектуализированные и экспертные системы. URL: <http://www.koriolan404.narod.ru/tipis/4.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
6. Воронцов В. А., Федоров Е. А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. 2015. № 82. С. 10–35.

### References

1. Ivanov I.G., Morozov S.V., Belokopytov M.L. Improving the quality of tests of space assets by using a decision support system based on precedents. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):121–130. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-15
2. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami: ucheb. posobie = Space flight control : textbook.* Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2010;(part 2):434. (In Russ.)



3. Gulyaev M.A., Bondareva M.K., Ivanov I.G., Zubkov G.A. Modeling the use of databases on the state of space assets for an automated control system for the operation and testing of space systems and complexes. *Voprosy kontrolya khozyaystvennoy deyatel'nosti i finansovogo audita, natsional'noy bezopasnosti, sistemnogo analiza i upravleniya: materialy VI Vseros. nauch.-prakt. konf. = Issues of control of economic activity and financial audit, national security, system analysis and management : materials of the VI All-Russian Scientific.-practical conf.* Moscow: FGBNU «Analiticheskiy tsentr». 2021:417–423. (In Russ.)
4. Bondareva M.K., Gulyaev M.A., Ivanov I.G. Methodology for selecting parameters of onboard spacecraft equipment for analysis by intellectualized systems. *Problemy oboronosposobnosti i bezopasnosti: sb. nauch. tr. = Problems of defense capability and security : collection of scientific works.* Moscow: FGBNU «Analiticheskiy tsentr» Minobrnauki RF, 2020;(22):183–199. (In Russ.)
5. *Intellektualizirovannye i ekspertnye sistemy = Intellectualized and expert systems.* (In Russ.). Available at: <http://www.koriolan404.narod.ru/tipis/4.htm> (accessed 01.12.2022).
6. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. Development of a prototype of an intelligent system for operational monitoring and technical condition of the main onboard systems of the spacecraft. *Trudy MAI = Proceedings of MAI.* 2015;(82):10–35. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Марк Львович Белокопытов**

кандидат технических наук,  
начальник научно-исследовательской лаборатории,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: hommer1990@mail.ru

##### **Mark L. Belokopytov**

Candidate of technical sciences,  
head of the research laboratory,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

##### **Константин Владимирович Ушанев**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник научно-  
исследовательской лаборатории,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: stan\_007@mail.ru

##### **Konstantin V. Ushanev**

Candidate of technical sciences,  
senior researcher of the research laboratory,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 26.11.2022**

**Поступила после рецензирования / Revised 24.12.2022**

**Принята к публикации / Accepted 20.01.2023**