

**РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ДЛЯ ПРИЕМОЧНОГО КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ**

В. А. Смирнов, Д. В. Смирнов

ЗАО «Научно-производственный центр «Акварин»  
Российская Федерация, 195196, г. Санкт-Петербург, ул. Таллинская, 7  
E-mail: vlad.sm2010@yandex.ru

*Рассмотрены результаты разработки концептуальной модели интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) для приемочного контроля (ПК) бортовых автоматизированных систем управления (БАСУ) летательным аппаратом (ЛА). Целью настоящей работы является формирование основных требований, принципов построения и разработка концептуальной модели ИСППР ПК сложных технических объектов для обеспечения своевременной и достоверной оценки состояния объекта контроля с минимальным истощением ресурса. В качестве методов исследования использовались методы системного анализа, технического контроля и диагностики, принятия решений и искусственного интеллекта. На этапе идентификации проблемной области рассмотрены ее основные особенности, сформулированы проблемы, определены задачи контроля, требующие обеспечения информационной поддержки лица, принимающего решения (ЛПР), при их выполнении. В качестве показателя эффективности ИСППР предложено использовать количественный показатель ценности информации. Сформулированы требования к информации, которой ИСППР обеспечивает ЛПР, приведена структура исходных данных и знаний, используемых при разработке ИСППР. Приведены основные принципы и требования к разработке и построению ИСППР.*

*На этапе концептуализации описаны интеллектуальные способности ЛПР и экспертов, положенные в основу архитектуры. Предложено формальное описание ИСППР и ее функций, приведена концептуальная модель системы. Рассмотрены предлагаемые подходы к моделированию функциональных модулей базы знаний (БЗ), основанные на методах теории искусственного интеллекта.*

*Предложенная модель ИСППР, отличающаяся целевым интеллектуально-методическим обеспечением ПК, дает возможность автоматизировать процесс контроля БАСУ и принимать более обоснованные управляющие решения по его результатам. Рассмотренная концепция построения ИСППР имеет перспективы успешного применения на других предприятиях ракетно-космической отрасли при создании систем поддержки принятия решений для целого ряда прикладных и исследовательских задач.*

*Ключевые слова:* бортовая автоматизированная система управления, приемочный контроль, интеллектуальная система поддержки принятия решений, прогнозирование.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet  
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik  
Vol. 18, No. 1, P. 149–159**DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL MODEL OF THE SYSTEM OF DECISION SUPPORT  
FOR ACCEPTANCE CONTROL OF ONBOARD EQUIPMENT**

V. A. Smirnov, D. V. Smirnov

JSC “The Scientific and Production Center “Akvarin”  
7, Tallinskaya Str., Saint-Petersburg, 195196, Russian Federation  
E-mail: vlad.sm2010@yandex.ru

*The results of development of conceptual model of intelligent decision support system (IDSS) are considered for acceptance control (AC) of onboard automated control system (OACS) of the aircraft. The aim of this work is the formation of the main requirements, principles of construction and development of a conceptual model of IDSS for AC of complex technical objects to ensure timely and accurate assessment of the condition of object of control with a minimum of resource depletion. As research methods we used methods of system analysis, technical control and diagnosis, decision-making and artificial intelligence. At the stage of identification of problem areas its main features have been considered, the problem has been formulated, objectives control requiring information support of decision-makers (DM) in implementing them have been set. As an index of efficiency of IDSS it offers to use the quantitative index of value of information. The information requirements, which IDSS provides the DM, given the structure of the*

source data and knowledge used in the development of IDSS, have been formulated. Basic principles over and requirements are brought to development and construction of IDSS.

At the stage of conceptualization the intellectual ability of DM and experts in the underlying architecture are described. The formal specification of IDSS and its functions offers, a conceptual model over of the system is brought. The offered approaches to simulation of the functional modules of the knowledge base based on methods of the theory of an artificial intelligence are considered.

The proposed model of IDSS, target different intellectual and methodological basis for acceptance control, gives the ability to automate the control process of OACS and make more informed management decisions on its results. In the paper the concept of construction of IDSS has potential for successful application in other enterprises of rocket-space industry to create systems of decision support for a range of applied and research tasks is considered.

*Keywords:* onboard automated control system, acceptance control, intelligent decision support system, prognostication.

**Введение.** Происходящие в последнее время события, связанные с неудачными запусками космических аппаратов, участвовавшие отказы в период предстартовой подготовки, а также опыт применения ракетной техники в боевых условиях свидетельствуют о наличии определенных проблем в проектировании, производстве и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники. Данное обстоятельство заставляет внимательно проанализировать весь жизненный цикл (ЖЦ) изделий, включая теоретические основы проектирования технологии ПК аппаратуры ракетной техники. ПК как завершающий этап производственного процесса является основным фактором, влияющим на качество функционирования, полноту выполнения назначенных функций, снижение вероятности и тяжести последствий отказов такого рода объектов ответственного назначения, применяемых в сложных условиях эксплуатации.

Одной из причин увеличения количества параметрических отказов, влияющих на качество функционирования ЛА и полноту выполняемых им назначенных функций, является недостаточный технический ресурс критичных элементов ЛА. Отсюда следует обоснованное требование к ужесточению ПК, к повышению точности и достоверности его результатов и своевременности принятия управляющих решений.

Бортовая система управления относится к группе аппаратуры изделий одноразового использования, входящей в класс бортовой аппаратуры ЛА, и обрабатывается на безотказность в ограниченном временном отрезке, который и составляет ограниченный ресурс или ограниченную наработку. Необходимость сохранения ресурса при проведении производственных и эксплуатационных контрольно-испытательных мероприятий и более глубокой оценки технического состояния изделия требует совершенствования технологии ПК путем дополнения круга решаемых ею задач и использования ИСППР. Это позволит исключить принятие ошибочных решений по результатам контроля с максимальным устранением человеческого фактора из этого процесса. Проведенное исследование лежит в русле дальнейшего развития и совершенствования теории и практики технологии приборостроения применительно к задачам контроля, прогнозирования и диагностирования сложной приборной аппаратуры с ограниченным ресурсом на примере БАСУ, что подчеркивает актуальность работы.

В данной работе предметом исследования является разработка оригинальной концептуальной модели ИСППР, характеризующейся целевыми интеллектуальными компонентами БЗ и осуществляющей эффективную поддержку решений сложных задач контроля.

Целью работы является формирование основных требований, принципов построения и разработка концептуальной модели ИСППР ПК сложных технических объектов для обеспечения своевременной и достоверной оценки состояния объекта контроля с минимальным исчерпанием ресурса.

**Идентификация проблемной области.** Использование интеллектуальных информационных технологий в реальной практике подразумевает учет специфики проблемной области, которая имеет следующие особенности:

- высокая структурная сложность, определяющая сложный характер взаимосвязей узлов и подсистем объекта контроля и множество возможных состояний при функционировании;
- отсутствие достаточно полного математического описания реакций и состояний технической системы в зависимости от различных событий;
- одновременное использование разнородной и значительной по объему информации при ограниченном времени на принятие решений;
- традиционные методы сбора, обработки, передачи, накопления и регистрации информации, необходимой для оперативного управления процессом контроля, не позволяют оперативно управлять производством, эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом БАСУ, что ведет к значительным временным потерям;
- ключевым источником наиболее достоверной информации в процессе контроля при наличии неопределенностей в результатах проверок и выборе возможных альтернативных решений являются высококвалифицированные специалисты.

Можно выделить следующие основные проблемы, требующие решения на современном этапе развития теории и практики ПК БАСУ:

- 1) сокращение выработки ресурса объекта при проведении контроля и диагностирования в процессе восстановления путем минимизации времени нахождения изделия во включенном состоянии на основе выработанных рекомендаций и обоснованной процедуры диагностирования при неполном обнаружении неисправностей;

2) повышение объективности и достоверности принимаемых решений при наличии неопределенностей в задачах контроля и ограниченного времени на анализ проблемных ситуаций путем максимального исключения человеческого фактора из процесса принятия решений при проведении всех видов контрольных мероприятий;

3) повышение точности и глубины оценок технического состояния изделия на основе качественно новых моделей, алгоритмов обработки результатов измерений и контроля, решающих правил распознавания и прогнозирования с целью выявления на ранней стадии развития признаков предотказного состояния изделия, что позволит определить место, вид и причину потенциальных отказов и сформировать рекомендации для принятия обоснованных решений по их предотвращению как для производителей, так и для эксплуатирующих организаций.

Решение такого рода проблем в рамках традиционных подходов вызывает непреодолимые трудности, связанные с необходимостью учета ряда факторов:

- неполноты, неоднозначности и противоречивости исходной информации (данных и знаний) и правил, используемых для ее преобразования;

- большой размерности пространства решения;

- нечеткости информации, имеющей качественный характер в виде интуитивных, приближенных оценок и эмпирических правил;

- необходимости применения как известных закономерностей, так и стратегий здравого смысла или логического вывода и разнообразных эвристических процедур;

- динамики изменяющихся данных и знаний.

Проблемы, имеющие такие характеристики, относятся к классу трудноформализуемых и слабоструктурированных проблем и требуют поддержки их решения средствами интеллектуальных технологий.

Целью разработки ИСППР является обеспечение информационной поддержки ЛПР при выполнении следующих задач контроля:

- определение технического состояния объекта контроля и его более глубокая оценка на основе качественных оценок значений критических параметров по критериям близости к границам полей допусков и аномальности поведения в пределах границ полей допусков;

- определение места и причин возникновения дефекта для анализа и разработки программы исследования отказа, позволяющей минимизировать расходование технического ресурса изделия при контроле и диагностировании на специализированных стендах контроля и диагностики при восстановлении изделия;

- прогнозирование технического состояния в будущий момент времени на основе прогнозных оценок дрейфа критических параметров;

- сбор и хранение исходных данных для анализа влияния конструкции, технологии производства и условий эксплуатации на качество функционирования БАСУ.

Поступление ЛПР недостающей информации от ИСППР позволит уменьшить информационную энтропию, характеризующую количество неопределенности в информации, внутреннюю неупорядочен-

ность информационной системы ПК, и изменит степень неосведомленности ЛПР о состоянии системы.

В качестве показателя эффективности ИСППР предлагается использовать количественный показатель ценности информации [1], который, согласно прагматическому подходу к определению меры информации [2], определяется приращением вероятности достижения той цели, для чего данная информация используется. Целевым показателем, характеризующим качество выполнения ПК, предлагается использовать  $P_{\text{вс}}$  – вероятность безошибочного и своевременного выполнения ПК. Ценность информации, которой ИСППР обеспечивает ЛПР, обуславливается комплексом основных потребительских показателей ее качества. Самая ценная информация, учитывающая особенности ее использования при ПК, должна быть достоверной, полной, доступной, своевременной, репрезентативной, актуальной и понятной (ясной) [1].

В качестве исходных данных и знаний при разработке ИСППР предлагается использовать информацию об изделии, процессах и ресурсах, полученную на различных этапах ЖЦ изделия. Структура такого рода информации в существующем информационном обмене в рамках ЖЦ приведена на рис. 1.

В качестве основных принципов, используемых при построении ИСППР, можно выделить следующие:

1. Принцип преемственности. Он заключается в обязательном учете в проектном решении ранее накопленного опыта, а также сохранении всех полезных для дальнейшего использования ресурсов и технических средств.

2. Принцип развития. Он состоит в том, что ИСППР разрабатывается с учетом возможности постоянного наращивания своего программно-математического обеспечения, ориентированного на расширение и обновление функциональных возможностей, состава задач и информационной базы. Расширение функциональности ИСППР предусматривается за счет обеспечения возможности включения новых программных модулей, совместимых с уже имеющимися модулями.

3. Модульный принцип построения программных средств, обеспечивающий возможность их замены, изменения с целью совершенствования ИСППР или ее адаптации к новым условиям. Модульная структура программного обеспечения позволяет вести поэтапное внедрение прикладных программ, гарантируя возможность автономного их применения, что ускоряет процесс внедрения.

4. Принцип гибкости, который заключается в возможности ИСППР поддерживать разные парадигмы представления знаний и решений задач, легкости модификации программ, наращивания БЗ, в возможности автоматизации процесса приобретения новых знаний.

5. Принцип конкуренции при выборе вычислительной технологии, который заключается в возможности обеспечить сравнительный анализ результатов обработки информации с использованием различных моделей представления знаний.

6. Принцип приближенной формализации нечеткой и неполной информации в вычислительной среде, позволяющий реализовать сложные модели представления и обработки нечеткой и неполной системы знаний.

7. Принцип стандартизации и унификации. Стандартизация предполагает, что разработку и развитие ИСППР следует осуществлять с ориентацией на информационное взаимодействие с другими системами в соответствии с правилами и протоколами национальных и международных стандартов. Необходимо

предусмотреть аппаратную, программную, лингвистическую и информационную совместимость. Унификация состоит в следовании правилу единообразия в методах, средствах, содержании и формах представления информации при разработке программного обеспечения.

8. Принцип адекватности, требующий использования адекватных реальным условиям проведения ПК моделей и методов, которые описывают объекты или выполняемые операции.

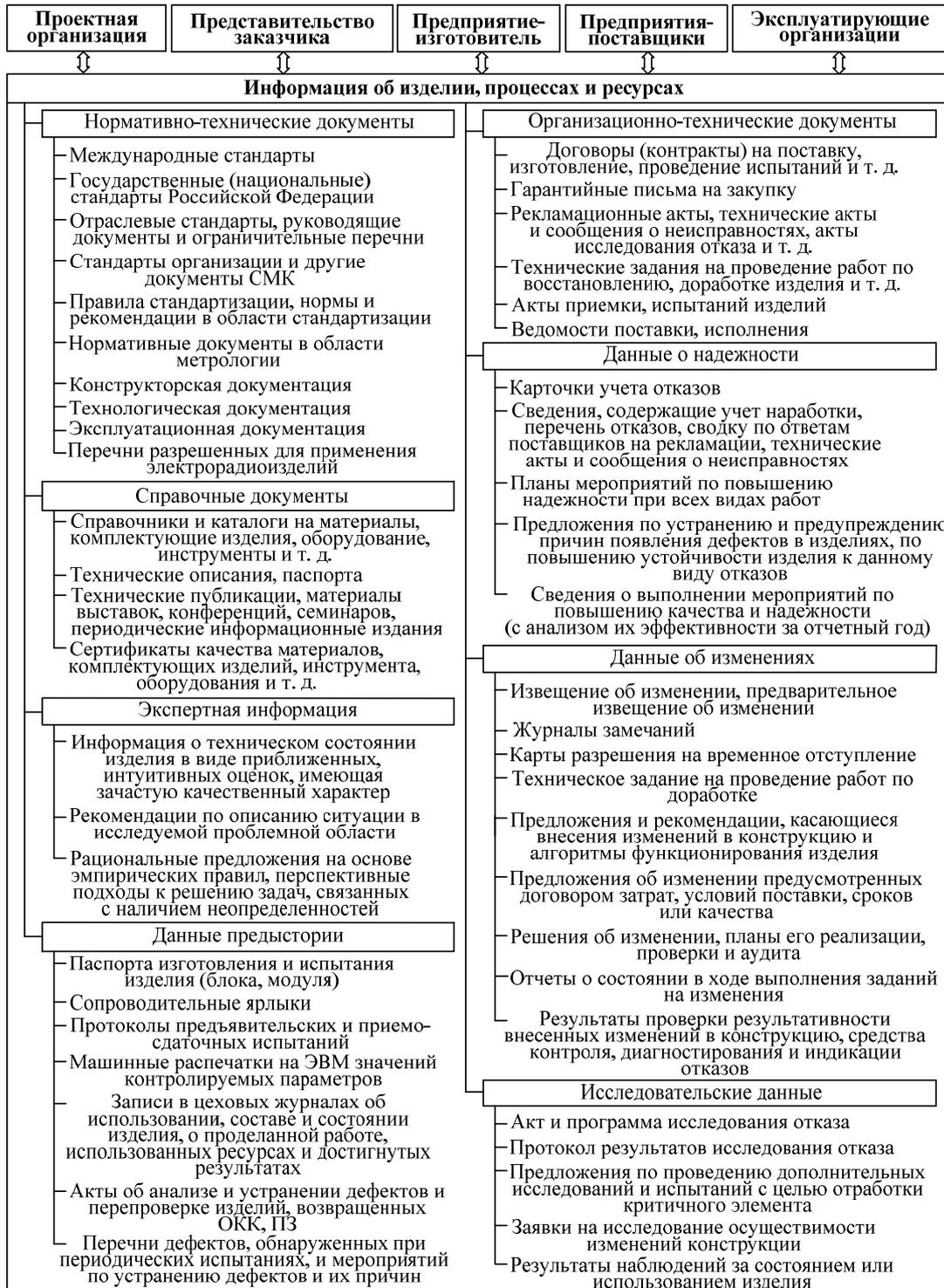


Рис. 1. Структура информации об изделии, процессах и ресурсах в существующем информационном обмене в рамках ЖЦ изделия

На основе анализа потребностей потенциальных пользователей и в соответствии с заявленными принципами построения ИСППР можно сформулировать набор следующих требований. ИСППР должна:

- иметь возможность интеграции с комплексом контрольно-проверочной аппаратуры (ККПА) БАСУ;
- иметь возможность сбора, хранения и накопления информации о проблемной области в базе данных (БД) и БЗ по трем направлениям: декларативной информации, экспертной информации, представляющей собой формализованные знания высококвалифицированных специалистов, и библиотеки прецедентов (БП) – информации о проблемных ситуациях, которые уже имели место в прошлом;

- основываться на применении адекватных и технически осуществимых формальных моделей для решения поставленных задач; процесс решения задач, отличающихся многокритериальностью, недостаточностью, нечеткостью и недостоверностью информации для принятия решения, должен обеспечиваться возможностью представления и обработки разнотипных знаний, данных и моделей, а также развития соответствующих БД, БЗ и моделей;

- должна обеспечиваться возможность информационного взаимодействия в рамках ЖЦ выпускаемого изделия;

- иметь возможность многоуровневой организации раздельного доступа к БД и БЗ при работе с ИСППР специалистам разных уровней ответственности.

Решение вопросов, связанных с извлечением и приобретением знаний как коммуникативными, так и текстологическими методами, их представлением и манипулированием, требует привлечения представителей следующих специальностей:

- экспертов в проблемной области, поставляющих знания в ИСППР и оценивающих правильность получаемых результатов;

- инженера по знаниям, обладающего необходимым комплексом знаний в предметной области, создаваемой ИСППР, практическими навыками и опытом приобретения, извлечения и представления знаний;

- программистов, разрабатывающих программное обеспечение ИСППР и осуществляющих его сопряжение со средой, в которой оно будет использоваться.

Следует заметить, что современный уровень развития информационных технологий [3; 4] и практика применения методов теории искусственного интеллекта [5–10] свидетельствуют о реалистичности построения ИСППР, соответствующей сложности решаемых задач и удовлетворяющей заявленным выше принципам и требованиям.

**Концептуальная модель ИСППР.** Под понятием «поддержка принятия решений» понимается совокупность процедур (обработка данных измерений, их анализ, формирование списка альтернатив, выбор лучшего решения и т. д.), обеспечивающих ЛПР необходимой информацией и рекомендациями, облегчающими процесс принятия решений. ИСППР представляет собой программно-аппаратный комплекс, использующий и интегрирующий элементы технологий искусственного интеллекта и информаци-

онных систем для обработки значительных объемов объективной и субъективной информации [11; 12]. В основу архитектуры ИСППР положены следующие интеллектуальные способности ЛПР и высококвалифицированных специалистов:

- 1) выявлять скрытые закономерности в эмпирических данных, позволяющих связывать различные факты одного события, относить объект к одному из заранее известных классов, прогнозировать будущие значения величин на основании их фактических значений, разбивать совокупность объектов на однородные группы и осуществлять поиск существующих структур в данных;

- 2) принимать обоснованные решения, т. е. осуществлять поиск, сбор, представление информации о проблемной области в удобном для анализа виде, разработку альтернатив и выбор рационального варианта решения, доведение его до исполнителей, контроль и внесение необходимых коррективов;

- 3) приобретать и сохранять знания, умения, стратегии, навыки и приемы;

- 4) обучаться, формировать новый опыт решения задачи в результате использования накопленного опыта решения аналогичных задач;

- 5) адаптироваться к изменяющимся условиям в процессе решения задачи: корректировать очередную попытку решения задачи и осуществлять поиск новых методов ее решения;

- 6) обмениваться информацией;

- 7) обрабатывать нечеткую, противоречивую, недостаточную или избыточную информацию;

- 8) использовать рассуждения при решении задач, относительную важность различных элементов в ситуации, планировать поведение и выявлять причинно-следственные взаимосвязи между факторами, действующими на объект, и переходом этого объекта в те или иные состояния.

Формально ИСППР может быть представлена с помощью кортежа

$$ISPPR = \langle I, IO, D, MD, Z, MZ, R \rangle,$$

где  $I = \{I_1, I_2, I_3\}$  – подсистема ввода результатов измерений от ККПА;  $I_1$  – модуль приема текущих данных;  $I_2$  – модуль предварительной обработки принятых данных;  $I_3$  – модуль представления вводимых данных в формате БД;  $IO = \{IO_1, IO_2, IO_3\}$  – подсистема информационного обмена с пользователями и внешними системами;  $IO_1$  – модуль взаимодействия с внешними информационными системами;  $IO_2 = \{IO_{21}, IO_{22}\}$  – модуль взаимодействия с пользователями;  $IO_{21}$  – компонент представления вводимых знаний в формате БЗ;  $IO_{22}$  – диалоговый компонент, включающий визуализацию и документирование информации в форме, необходимой пользователю;  $IO_{23}$  – компонент адаптации и модификации знаний, а также адаптации к изменениям в информационных потребностях пользователей, к изменениям условий решения задачи;  $IO_3$  – модуль организации раздельного доступа к БД и БЗ;  $D = \{D_1, D_2, D_3\}$  – подсистема хранения данных;  $D_1$  – рабочая память для хранения текущих данных измерений, исходных и промежуточных данных решаемой в текущий момент задачи;  $D_2$  – модуль

накопления и хранения данных об изделии;  $D_3$  – модуль накопления и хранения справочно-диагностической информации;  $MD$  – подсистема управления данными;  $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\}$  – подсистема хранения знаний;  $Z_1$  – множество моделей, реализующих функцию определения технического состояния объекта контроля;  $Z_2$  – множество моделей, реализующих функцию определения места и причин возникновения дефекта;  $Z_3$  – множество моделей, реализующих функцию прогнозирования дрейфа критических параметров;  $Z_4$  – множество процедур выполнения всех необходимых системе вычислений и преобразований;  $MZ$  – подсистема управления знаниями;  $R$  – подсистема решения задач.

На основе сформулированных принципов и требований и в условиях отсутствия прямых аналогов подобной системы, ограничивающих возможность использования каких-либо типовых проектных решений и прикладных систем, была разработана концептуальная модель ИСППР, представленная на рис. 2. Концептуальная модель ИСППР представляет собой совокупность обобщенных функциональных компонентов, принципов их взаимодействия между собой, с ККПА, пользователями и внешней средой и определяет смысловую структуру разрабатываемой системы.

ИСППР предусматривает выполнение следующих основных функций:

- ввод информации, источниками которой являются ККПА (данные измерений), PDM-системы (данные и знания аналогичных ИСППР), ЛПП (данные условий решения задачи), инженер по знаниям (новые и скорректированные данные и знания), программист (разработанное или скорректированное программное обеспечение);
- предварительная обработка информации для преобразования к виду, пригодному для использования;
- хранение поступившей информации в БД и БЗ по разработанному формату;
- обработка информации (сортировка, выборка, арифметическая и логическая обработка) для решения функциональных задач;
- оценка контролируемых параметров и технического состояния объекта контроля;
- диагностирование отказов объекта контроля;
- прогнозирование технического состояния объекта контроля;
- формирование отчета о результатах интеллектуального анализа данных;
- поиск информации по различным признакам;
- вывод и графическая визуализация аналитической (рекомендаций для формирования решений) и справочной информации для представления пользователям или передачи в информационную систему предприятия;
- настройка и адаптация решателя, структуры и параметров БД и БЗ к конкретным условиям функционирования;
- регламентация прав доступа к информации и защиты данных.

Далее рассмотрим предлагаемые подходы к моделированию функциональных модулей БЗ.

При оценке значения параметра, находящегося внутри поля допуска, в основе рассуждений высококвалифицированных специалистов лежит оперирование с нечеткими, размытыми границами между качественными состояниями параметра, имеющего лингвистическую оценку «годен», например между «удовлетворительно велико» и «опасно велико». Для разработки метода оценки критических параметров по критерию близости к границам полей допусков предлагается использовать нечетко-множественный подход к построению математической модели параметра.

Для критических параметров рассматриваемой БАСУ можно использовать непрерывную математическую модель параметра со стандартными формами функций принадлежности, графически представленными на рис. 3, где  $x_{\text{опт}}$  – оптимальное значение параметра  $x$ ;  $x_{\text{мин}}$  и  $x_{\text{макс}}$  – минимальное и максимальное значения параметра  $x$ , являющиеся границами областей гарантированной неработоспособности, характеризуемой интервалами  $[0, x_{\text{мин}}]$  и  $[x_{\text{макс}}, x_{\text{пред}}]$ .

Нечеткую переменную «годен» описывает стандартная функция принадлежности  $\mu_t(x)$  класса  $t$ , «негоден меньше» –  $\mu_{\text{нм}}(x)$  класса  $L$ , «негоден больше» –  $\mu_{\text{нб}}(x)$  класса  $\gamma$ . Интервалы  $[x_{\text{мин}}, x_{\text{д.мин}}[$  и  $]x_{\text{д.макс}}, x_{\text{макс}}[$  характеризуют области негарантированной работоспособности, а интервал  $[x_{\text{д.мин}}, x_{\text{д.макс}}]$  – область гарантированной работоспособности.

Для определения границ между подклассами класса оценки параметра «годен», например «опасно мало» и «удовлетворительно мало», необходимо произвести дискретизацию нечеткой переменной и вычислить значения границ подклассов по формуле:

$$\mu_{\Gamma}(x; x_{\text{мин}}, x_{\text{опт}}, x_{\text{макс}}) = \begin{cases} 0, & x \leq x_{\text{мин}}, \\ \frac{x - x_{\text{мин}}}{x_{\text{опт}} - x_{\text{мин}}}, & x_{\text{мин}} \leq x \leq x_{\text{опт}}, \\ \frac{x_{\text{макс}} - x}{x_{\text{макс}} - x_{\text{опт}}}, & x_{\text{опт}} \leq x \leq x_{\text{макс}}, \\ 0, & x \geq x_{\text{макс}}. \end{cases}$$

Дискретизацию нечеткой переменной на четкие множества можно производить на основе заданных экспертом значений  $\alpha$ , которые называются  $\alpha$ -уровнями и являются количественной характеристикой степени выраженности свойства «годен» отдельными значениями контролируемого параметра и равны заданному уровню уверенности эксперта в такой характеристике. Для идентификации значений критических параметров в соответствии с классификационными признаками предлагается использовать продукционную систему правил. Результатом идентификации является отнесение контролируемого параметра в зависимости от его численного значения к определенной области из классифицированного множества возможных качественных оценок параметра работоспособной системы и присвоение ему соответствующей качественной оценки, выраженной на естественном языке и сохраняющей семантическую достоверность экспертных оценок, например «опасно мало», «удовлетворительно мало».

Для классификации по критерию аномальности поведения значений критических параметров в пределах границ полей допусков необходимо задать числовые значения  $\Delta x_{\text{доп. макс}}$  и  $\Delta x_{\text{доп. мин}}$ , используя знания опытных специалистов-экспертов. Значение  $\Delta x$  представляет собой разность между максимальным и минимальным значением параметра из всех значений, полученных в ходе предъявительских испытаний, проведения технологического прогона и приемочного

контроля. Значения  $\Delta x_{\text{доп. макс}}$  и  $\Delta x_{\text{доп. мин}}$  позволяют определить границы областей, соответствующих подклассам классификатора.

Для идентификации значений критических параметров предлагается использовать набор продукционных правил логического вывода. Результатом идентификации будет являться набор качественных оценок критических параметров, например «допустимая аномальность» или «отсутствие аномальности».

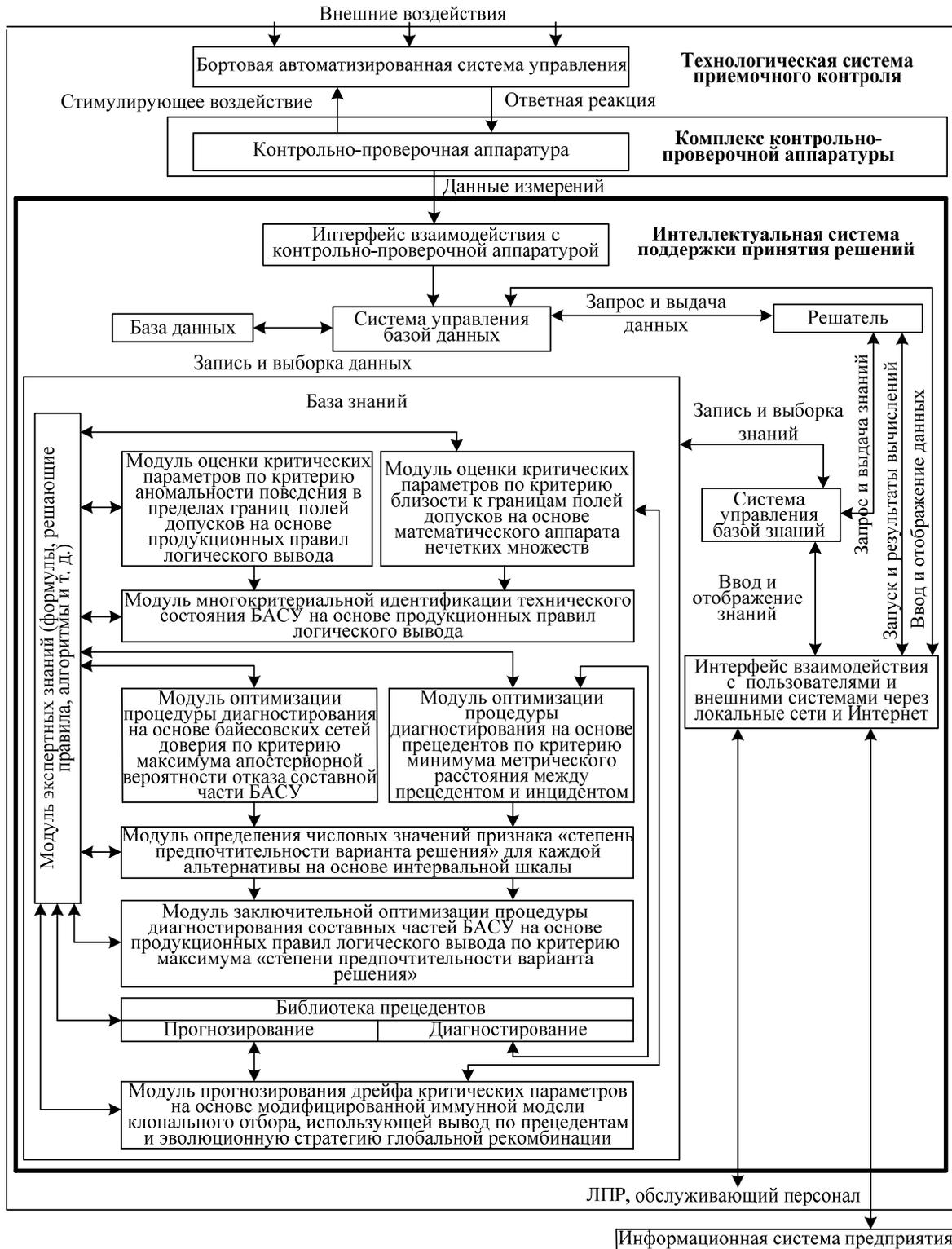


Рис. 2. Концептуальная модель ИСПП

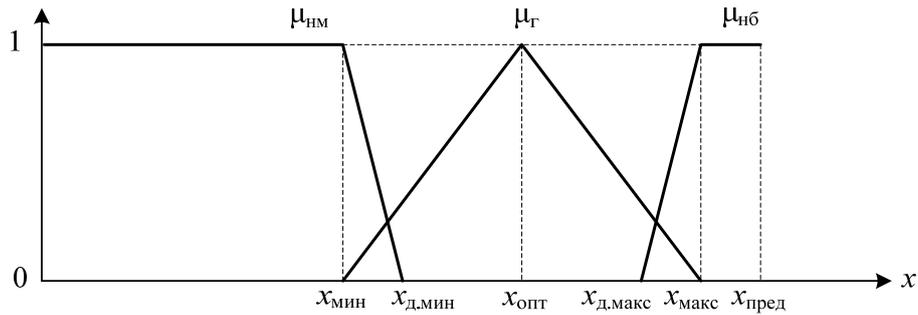


Рис. 3. Функции принадлежности нечетких переменных  $\mu_{нм}$  («не годен меньше»),  $\mu_г$  («годен»),  $\mu_{нб}$  («не годен больше»)

Модули, решающие задачу оптимизации процедуры диагностирования при наличии неопределенностей в результатах контроля, предлагается разрабатывать на основе байесовского и прецедентного подходов к моделированию рассуждений, опыта и знаний высококвалифицированных специалистов.

При поиске причин и места отказа БАСУ специалисты анализируют наблюдаемые проявления инцидента, проводят вероятностные рассуждения на основе знания из опыта вероятностных закономерностей между нарушениями в работе объекта контроля и причинами, их вызвавшими. Однако они не могут с полной уверенностью сказать, какая составная часть изделия вызвала тот или иной неудовлетворительный результат параметрического контроля. В процессе рассуждений выражаются качественные оценки, имеющие вероятностный и нечеткий характер, например, «скорее всего», «маловероятно» и т. д. Для моделирования вероятностных рассуждений предлагается использовать математический аппарат байесовских сетей доверия. Основой для принятия решений в условиях неопределенности на основе байесовских сетей является байесовский (апостериорный) вывод, базирующийся на фундаментальных положениях и результатах теории вероятности: формуле Байеса, формуле полной вероятности, правиле обобщенной суммы или правиле суммирования, формуле вероятности совместного наступления событий и цепном правиле.

Результатом оптимизации процедуры диагностирования составных частей БАСУ будет ранжированная последовательность вычисленных вероятностей неработоспособных состояний составных частей БАСУ в направлении убывания их значений, что и является оптимальным решением [13].

Другим из естественных способов рассуждений, который применяют высококвалифицированные специалисты на первых порах, сталкиваясь с новой задачей поиска неисправностей, состоит в следующем: они анализируют проблемную ситуацию, вспоминают, какие решения принимались ранее в подобных случаях. При необходимости эти решения адаптируются в соответствии с текущей ситуацией. Интуитивно понятно, что правильнее начинать с какого-то приблизительного решения в условиях отсутствия четкого варианта действий. Для моделирования таких рассуждений предлагается использовать один из методов

интеллектуального анализа данных (Data Mining) – метод моделирования рассуждений на основе прецедентов (П) (Case-Based Reasoning – CBR). В основе поиска, формирования и вывода решения в виде ранжированного списка П предлагается использовать трехуровневую модель поиска похожих П и метод ближайшего соседа [14; 15]. Выполнив классификацию параметров, позволяющую объединить их в подмножества, соответствующие заданной глубине поиска, для вычисления метрического расстояния на каждом иерархическом уровне поиска можно использовать модифицированные формулы Хэмминга:

$$d_1(X_1, X_{1t}) = \sum_{i=1}^k wx_{1i} |x_{1i} - x_{1ti}|,$$

$$d_2(X_2, X_{2t}) = \sum_{i=1}^m wx_{2i} |x_{2i} - x_{2ti}|,$$

$$d_3(X_3, X_{3t}) = \sum_{i=1}^j wx_{3i} |x_{3i} - x_{3ti}|,$$

где  $X_1 (X_2, X_3)$  – множество параметров БАСУ, описывающее данный П в булевском формате, соответствующее 1-му (2-му, 3-му) уровню глубины поиска;  $X_{1t}, X_{2t}, X_{3t}$  – множество параметров БАСУ, характеризующих инцидент, т. е. текущее состояние отказа;  $wx_{1i} (wx_{2i}, wx_{3i})$  – весовые коэффициенты множества  $WX_1 (WX_2, WX_3)$ , учитывающие относительную ценность каждого параметра, входящего в  $X_1 (X_2, X_3)$ . Значение весового коэффициента измеряется в интервале от 0 до 1 и назначается экспертом.

Синергетическая комбинация рассмотренных подходов к оптимизации процедуры диагностирования, представляющих разные концепции обработки знаний, позволит эффективно использовать их преимущества и в то же время преодолевать некоторые недостатки. Для заключительной оптимизации процедуры диагностирования составных частей БАСУ предлагается использовать интервальную шкалу для определения числового значения признака «степень предпочтительности варианта решения», систему продукционных правил и процедуру ранжирования числовых значений признака «степень предпочтительности варианта решения», полученных для каждого альтернативного решения, в направлении убывания их значений.

Для решения задачи прогнозирования дрейфа контролируемых параметров БАСУ предлагается применить комбинацию активно развивающихся подходов, а именно, метода моделирования рассуждений на основе П, иммунной модели клональной селекции [7; 16; 17] и метода аппроксимации кубическими сплайнами. Идея предлагаемого подхода заключается в получении прогнозной модели на основе трендовых зависимостей дрейфа параметров, используя данные значений параметров, сохраненные в виде прецедентов в БП. Выбор, адаптация и генерация П для решения текущей задачи прогнозирования осуществляется алгоритмом клональной селекции, имитирующим принципы работы, и конкретные особенности функционирования иммунной системы человека, а также природные оптимизационные механизмы наследственности, изменчивости и отбора, происходящие при эволюции живых организмов. Для получения трендовых зависимостей и расчета пропущенных значений временных рядов предлагается использовать метод аппроксимации экспериментальных данных о значениях контролируемых параметров БАСУ, зафиксированных в определенные моменты времени  $t$  в процессе различных контрольных испытаний кубическими сплайнами.

Кубический сплайн дефекта  $l$  с узлами, совпадающими с узлами табличной функции  $f(t)$ , которая устанавливает связь между значением параметра  $x$  и временем  $t$ , описывается уравнением

$$Spl(t) = \begin{cases} Spl_1(t), & t \in [t_0, t_1], \\ Spl_2(t) & t \in [t_1, t_2], \\ \dots \\ Spl_i(t) & t \in [t_{i-1}, t_i], \\ \dots \\ Spl_n(t) & t \in [t_{n-1}, t_n]. \end{cases}$$

Кусочные функции сплайна представляют собой полиномы третьей степени:

$$Spl_i(t) = a_i + b_i \cdot (t - t_i) + c_i \cdot (t - t_i)^2 + d_i \cdot (t - t_i)^3,$$

где  $a_i, b_i, c_i, d_i$  – коэффициенты полиномов,  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  – номер кусочной функции сплайна. Эти аналитические зависимости кодируются в структуре антитела.

Для вычисления значения функции аффинности детекторной части клонов антител по отношению к антигену предлагается использовать формулу

$$Aff(Ag, Ab_i) = \frac{1}{1 + D(Ag, Ab_i)},$$

где  $D(Ag, Ab_i)$  – евклидово расстояние между  $i$ -м клоном антитела  $Ab_i$  и антигеном  $Ag$ :

$$D(Ag, Ab_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^k (ag_j - ab_{ij})^2},$$

где  $ag_j - ab_{ij}$  – известные значения временного ряда в структуре антигена и детекторной части клона антитела;  $j$  – длина выборки.

Для повышения эффективности работы иммунного алгоритма клональной селекции предлагается исполь-

зовать оператор, реализующий эволюционную стратегию глобальной промежуточной рекомбинации. В результате рекомбинации параметры генетической структуры потомка формируется следующим образом:

– значения критического параметра определяются на основе средних значений родителей по формуле

$$\overline{ab}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_k ab_{ik},$$

где  $\overline{ab}_i$  – значение  $i$ -го параметра (значение параметра временного ряда) потомка;  $n$  – количество клонов антител в промежуточной популяции;

– аналитические зависимости между двумя соседними значениями полученного временного ряда получаются путем аппроксимации кубическим сплайном.

Также предлагается применить в алгоритме операции скрещивания, использующую принцип технологии конструирования вакцин и позволяющую формировать комплексы «антиген–антитело».

Задача прогнозирования технического состояния в будущий момент времени на основе прогнозных оценок дрейфа критических параметров решается путем комплексного применения методов и моделей, заложенных в функциональных модулях БЗ.

Отметим, что рассмотренные выше подходы к решению задач приемочного контроля позволяют получать приближенные решения с удовлетворительной точностью, поскольку точное решение найти или невозможно, или ресурсоемко.

В рассматриваемой системе предусмотрен интерфейс взаимодействия с пользователями и внешними системами. Он включает коммуникационные механизмы для связи и обмена информацией в рамках ЖЦ выпускаемого изделия, а также между аналогичными ИСППР. Наличие таких информационных связей дает основу для индивидуального сопровождения каждого изделия в процессе его ЖЦ, обмена накопленным опытом, позволяющим эффективно совершенствовать БЗ, а также своевременно принимать корректирующие решения.

**Заключение.** Разработанная концептуальная модель ИСППР, отличающаяся целевым интеллектуально-методическим обеспечением ПК, дает возможность автоматизировать процесс контроля БАСУ и принимать более обоснованные управляющие решения по его результатам. Это, в свою очередь, позволит получить достоверную оценку технического состояния изделия, минимизировать расходование ресурса изделия при поиске дефектов, повысить характеристики надежности БАСУ, уменьшить трудовые, материальные и финансовые затраты. Предложенная модель имеет перспективы успешного применения на других предприятиях ракетно-космической отрасли при создании систем поддержки принятия решений для целого ряда прикладных и исследовательских задач.

### Библиографические ссылки

1. Смирнов В. А. Способ оценки эффективности системы поддержки принятия решений с позиции ее

информационных свойств в задачах контроля сложных систем // Морской вестник. 2016. № 1S (12). С. 34–37.

2. Корогодина В. И., Корогодина В. Л. Информация как основа жизни. Дубна : Издательский центр «Феникс», 2000. 208 с.

3. Карелин В. П. Интеллектуальные информационные технологии и системы для поддержки принятия решений // Вестник ТИУиЭ. 2011. № 2(14). С. 79–84.

4. Блинков Е. В., Шишаев А. М., Назаров В. П. Применение CALS-технологий в условиях разработки и постановки на производство изделий ракетно-космической техники // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1, № 10. С. 42–43.

5. Варшавский П. Р., Еремеев А. П. Поиск решения на основе структурной аналогии для интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 1. С. 97–109.

6. Фефелов А. А. Использование байесовских сетей для решения задачи поиска места и типа отказа сложной технической системы // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2007. № 2(20). С. 87–93.

7. Кораблев Н. М., Иващенко Г. С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования временных рядов на основе модели клонального отбора // Нейроинформатика : науч.-техн. конф. с междунар. участием : сб. науч. тр. М., 2014. Т. 1. С. 79–89.

8. Николайчук О. А., Юрин А. Ю. Прототип интеллектуальной системы для исследования технического состояния механических систем // Искусственный интеллект. 2006. № 4. С. 459–468.

9. Нечаев Ю. И., Дегтярев А. Б., Сиек Ю. Л. Принятие решений в интеллектуальных системах реального времени с использованием концепции мягких вычислений // Искусственный интеллект. 2000. № 3. С. 525–533.

10. Варшавский П. Р., Еремеев А. П. Реализация методов поиска решения на основе аналогий и прецедентов в системах поддержки принятия решений // Вестник МЭИ. 2006. № 2. С. 77–87.

11. Матюшин М. М., Саркисян Х. В. Построение оценочной функции для поддержки принятия оперативных решений при контроле параметров состояния космического аппарата [Электронный ресурс] // Наука и образование : электрон. науч.-техн. изд. 2011. С. 1–15. URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/174749.html> (дата обращения: 12.11.2016).

12. Лазарсон Э. В. Формализация знаний и интеллектуальная поддержка принятия решений в задачах выбора // Интеллектуальные системы в производстве. 2006. № 2(8). С. 4–14.

13. Смирнов В. А. Поиск неисправностей в бортовых системах управления в процессе приемочного контроля // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 24–28.

14. Смирнов В. А. Прецедентный подход к построению моделей процесса поиска неисправностей при диагностировании сложных технических систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 6. С. 73–78.

15. Ларин В. П., Смирнов В. А. Методика формирования моделей прецедента и библиотеки прецеден-

тов для принятия решений в системе приемочного контроля сложных технических объектов // Известия ГУАП. 2013. № 4. С. 34–40.

16. Дасгупта Д. Искусственные иммунные системы и их применение. М. : Физматлит, 2006. 344 с.

17. Антух А. Э., Карпенко А. П. Глобальная оптимизация на основе гибридизации методов роя частиц, эволюции разума и клональной селекции [Электронный ресурс] // Наука и образование : электрон. науч.-техн. изд. 2012. С. 379–416. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/431723.html> (дата обращения: 28.11.2016).

## References

1. Smirnov V. A. [Method of evaluating a decision support system from the perspective of its information properties in tasks of controlling complex technical systems]. *Morskoy Vestnik*. 2016, No. 1S (12), P. 34–37 (In Russ.).

2. Korogodin V. I., Korogodina V. L. *Informatsiya kak osnova zhizni* [Information as the basis of life]. Dubna, Feniks Publ., 2000, 208 p.

3. Karelin V. P. [Intellectual information technologies and systems for decision support]. *Vestnik TIUE*. 2011, No. 2 (14), P. 79–84 (In Russ.).

4. Blinkov E. V., Shishaev A. M., Nazarov V. P. [Use of CALS-technologies in the conditions of development and setting on production of products of the missile and space equipment]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2014, Vol. 1, No. 10, P. 42–43 (In Russ.).

5. Varshavskiy P. P., Eremeev A. P. [Search solutions based on structural analogy to intelligent systems of decision support]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2005, No. 1, P. 97–109 (In Russ.).

6. Fefelov A. A. [The use of Bayesian networks to solve the problem of search space and the type of failure of complex engineering systems]. *Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy*. 2007, No. 2(20), P. 87–93 (In Russ.).

7. Korablev N. M., Ivashchenko G. S. [A hybrid method of short-term time series forecasting based on the model of clonal selection]. *Neyroinformatika: nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: sbornik nauchnykh trudov*. 2014, Vol. 1, P. 79–89 (In Russ.).

8. Nikolaychuk O. A., Yurin A. Yu. [A prototype of intelligent system for investigation of technical conditions of mechanical systems]. *Iskusstvennyy intellekt*. 2006, No. 4, P. 459–468 (In Russ.).

9. Nechaev Yu. I., Degtyarev A. B., Siek Yu. L. [Decision making in intelligent real-time systems using the concept of soft computing]. *Iskusstvennyy intellekt*. 2000, No. 3, P. 525–533 (In Russ.).

10. Varshavskiy P. R., Eremeev A. P. [Implementation of methods of search of decisions on the basis of analogies and precedents in systems of support of decision-making]. *Vestnik MEI*. 2006, No. 2, P. 77–87 (In Russ.).

11. Matyushin M. M., Sarkisyan Kh. V. [The construction of the evaluation function to support operational decisions in the control parameters of the spacecraft state]. *Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie "Nauka i obrazovanie"*. 2011, P. 1–15 (In Russ.).

Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/174749.html> (accessed 12.11.2016).

12. Lazarson E. V. [Formalization of knowledge and intellectual support of decision-making in problems of selection]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2006, No. 2(8), P. 4–14 (In Russ.).

13. Smirnov V. A. [Malfunction searching in onboard control systems during acceptance control]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2013, No. 2, P. 24–28 (In Russ.).

14. Smirnov V. A. [Precedential approach to model building process troubleshooting for diagnosing complex technical systems]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*. 2013, No. 6, P. 73–78 (In Russ.).

15. Larin V. P., Smirnov V. A. [Technique of formation models precedent and case library for decision-making in the acceptance inspection of complex technical objects]. *Izvestiya GUAP*. 2013, No. 4, P. 34–40 (In Russ.).

16. Dasgupta D. *Iskusstvennyye immunnye sistemy i ikh primeneniye* [Artificial immune systems and their applications]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 344 p.

17. Antukh A. E., Karpenko A. P. [Global optimization based on hybridization methods swarm of particles, the evolution of the mind and clonal selection]. *Elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie "Nauka i obrazovanie"*. 2012, P. 379–416 (In Russ.). Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/431723.html> (accessed 28.11.2016).

© Смирнов В. А., Смирнов Д. В., 2017