

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Северцев Н. А., Бецков А. В., Лончаков Ю. В. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫЯВЛЕНИЮ УЯЗВИМОСТИ СОЦИАЛЬНО ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИМ УГРОЗАМ.....	3
Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ	10
Карамзин Д. Ю., Перейра Ф. А. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ НОРМАЛЬНОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ ТИПА РАВЕНСТВ И НЕРАВЕНСТВ	20
Северцев Н. А., Бецков А. В., Прокопьев И. В. СИСТЕМНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ.....	26
Кудрявцев С. Н. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРНОЗНАЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПО ЗНАЧЕНИЯМ НА НИХ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ	32
Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. К ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	37

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Сидняев Н. И., Уракова К. А. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ДОПУСТИМОМУ УРОВНЮ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ.....	47
Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н. АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ И КОНФИГУРИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ.....	68
Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. ПОРОШКОВЫЕ КОМПОЗИТЫ И НАНОМАТЕРИАЛЫ В ГИБКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ	85

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Роганов В. Р., Кувшинова О. А., Есимова Н. С., Асмолова Е. А., Тюрина А. А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭРГАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ «АВИАЦИОННЫЙ ТРЕНАЖЕР» ЗА СЧЕТ ДОБАВЛЕНИЯ УЧЕБНЫХ СИТУАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С РЕШЕНИЕМ ЗАДАЧ САМОЛЕТОВОЖДЕНИЯ.....	96
Мишанов Р. О. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ.....	106
Кургаев С. Ж., Куатов Б. Ж. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР И ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ АВИАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ	115

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Воронин Е. А. ОЦЕНКА И ВЫБОР СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВИЕМ	124
--	-----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Severtsev N. A., Betsko A. V., Lonchakov Yu. V. METHODOLOGICAL APPROACHES TO IDENTIFYING THE VULNERABILITY OF SOCIALLY IMPORTANT OBJECTS TO TERRORIST THREATS	3
Diveev A. I., Shmalko E. Yu. RESEARCH OF SYNTHESIZED OPTIMAL CONTROL FOR A GROUP OF ROBOTS IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTIES	10
Karamzin D. Yu., Pereira F. L. INVESTIGATION OF CONDITIONS FOR NORMALITY IN CONTROL PROBLEMS WITH EQUALITY AND INEQUALITY STATE CONSTRAINTS	20
Severtsev N. A., Betskov A. V., Prokop'ev I. V. SYSTEM PRESENTATION OF SECURITY CONCEPT	26
Kudryavtsev S. N. RESTORATION OF VECTOR-VALUED FUNCTIONS BY VALUES AT THEIR LINEAR FUNCTIONALS.....	32
Diveev A. I., Shmalko E. Yu. TO THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF SOLVING THE OPTIMAL CONTROL PROBLEM.....	37

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Sidnyaev N. I., Urakova K. A. METHOD FOR DETERMINING THE FREQUENCY OF DIAGNOSING SPACE SYSTEMS BY THE ACCEPTABLE LEVEL OF PROBABILITY OF UPTIME	47
Masloboev A. V., Tsygichko V. N. INFORMATION STRUCTURE ANALYSIS AND CONFIGURATION OF DECISION SUPPORT SYSTEM OF REGIONAL SITUATIONAL CENTERS	68
Perevertov V. P., Andronchev I. K., Yurkov N. K. POWDER COMPOSITES AND NANOMATERIALS IN FLEXIBLE MATERIALS TECHNOLOGIES FOR FORMING PARTS.....	85

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

Roganov V. R., Kuvshinova O. A., Esimova N. S., Asmolova E. A., Tyurina L. A. IMPROVEMENT OF ERGATIC SOFTWARE AND TECHNICAL COMPLEXES "AIRCRAFT SIMULATOR" BY ADDING TRAINING SITUATIONS RELATED TO THE SOLUTION OF NAVIGATION TASKS	96
Mishanov R. O. THE APPLICATION OF SINGLE-LAYER PERCEPTRON FOR SOLVING PATTERN CLASSIFICATION TASK OF ELECTRONIC COMPONENTS IN ORDER TO IMPROVE THE QUALITY AND RELIABILITY OF ONBOARD EQUIPMENT	106
Kurtayev S. Zh., Kumatov B. Zh. METHOD OF INCREASING EFFICIENCY OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES AND PROCESSES OF SERVICE PRODUCTION OF AVIATION TECHNICAL CENTERS	115

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Voronin E. A. EVALUATION AND SELECTION OF FOOD SECURITY SYSTEMS	124
---	-----

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 153.14

DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-1

Н. А. Северцев, А. В. Бецков, Ю. В. Лончаков

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫЯВЛЕНИЮ УЯЗВИМОСТИ СОЦИАЛЬНО ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИМ УГРОЗАМ

N. A. Severtsev, A. V. Betskov, Yu. V. Lonchakov

METHODOLOGICAL APPROACHES TO IDENTIFYING THE VULNERABILITY OF SOCIALLY IMPORTANT OBJECTS TO TERRORIST THREATS

Аннотации. *Актуальность и цели.* С позиции системного анализа представленный в статье подход демонстрирует методологию создания теории безопасности с учетом воздействия субъекта на работу исследуемого объекта внутренних и внешних возмущений, что приводит к деформации параметрической области безопасности при различных возмущениях. *Материалы и методы.* При этом, на основе информации в качественном виде даны показатели безопасности в пространстве состояний, а также методы построения схем формирования оценки безопасности. Решены две задачи – наличие модифицированной области в пространстве состояний, которая наиболее объективно свидетельствует об удаленности текущего режима работы системы от состояния, угрожающего его целостности, а также определение показателей безопасности, имеющих большую физическую наглядность и меньшую сложность вычислений. *Результаты и выводы.* Таким образом, показано, что для построения оперативной системы мер по недопущению превращения угроз в катастрофические (аварийные) для системы целесообразно использовать информацию о входных воздействиях со стороны среды и отклонениях параметров системы. С этой целью пригодны показатели управляемости, наблюдаемости и устойчивости, а также энергетические ресур-

Abstracts. *Background.* From the point of view of system analysis, the approach presented in the article demonstrates the methodology for creating a safety theory taking into account the subject's influence on the operation of the studied object of internal and external disturbances, which leads to deformation of the parametric safety region for various disturbances. *Materials and methods.* Based on the information in a qualitative form, the safety indicators in space are given states, as well as methods for constructing safety assessment formation schemes. Two problems have been solved – the presence of a modified region in the state space, which most objectively indicates the remoteness of the current system operation mode from a state that threatens its integrity, as well as the determination of safety indicators that have greater physical visibility and less computational complexity. *Results and conclusions.* Thus, it is shown that in order to build an operational system of measures to prevent the transformation of threats into catastrophic (emergency) ones, it is advisable for the system to use information about the input influences from the environment and deviations of the system parameters. For this purpose, indicators of controllability, observability and stability are suitable, as well as energy resources, most of which are quite simply satisfied when designing or preparing the system for work. It was shown that the simplification of

сы, большинство из которых достаточно просто удовлетворяется при проектировании или подготовке системы к работе. Показано, что упрощение моделей рационально проводить путем: выявления критических угроз и/или их объединения в эталонные группы; отказа от непрерывной модели системы и перехода к конечным зависимостям между воздействиями и реакциями системы. Данный подход применим для обоснования методологии безопасности робототехнических систем и аэромобильных комплексов, в том числе обладающих искусственным интеллектом.

Ключевые слова: математическая формализация, уязвимость системы в течение задаваемого периода времени, потенциальные размеры нанесенного ущерба, вероятность.

models is rational to carry out by: identifying critical threats and / or combining them into reference groups; abandonment of a continuous model of the system and the transition to the final dependencies between the effects and reactions of the system. This approach is applicable to justify the safety methodology of robotic systems and airborne complexes, including those with artificial intelligence.

Keywords: mathematical formalization, vulnerability of the system during a given time period, potential damage, probability.

Анализ развития множества свершившихся террористических актов позволяет выявить следующие общие тенденции, осознание которых необходимо для осуществляемой математической формализации:

1) в силу скрытности подготовки акты терроризма зачастую носят для системы внезапный характер, и, выражаясь языком теории вероятностей, проявление каких-либо событий террористической деятельности может быть описано в терминах случайных величин и процессов;

2) применяемые способы противодействия, включающие целенаправленный сбор и анализ оперативной информации для выявления подозрительных событий и действий, выработку и реализацию контрмер, направлены на всестороннее и всемерное снижение уровня скрытности подготовки, ухудшение условий деятельности террористов. Как следствие, это может привести к смене объекта террористической атаки, отказу от террористического акта или переносу сроков его осуществления, к неподготовленности террористов к некоторым из возможных сценариев развития террористической атаки и в итоге – к повышению требуемой безопасности системы;

3) технологии защиты систем с формальной точки зрения представляют собой последовательность преград от несанкционированного доступа и действий, преодоление которых при совершении террористической атаки требует определенного времени террористов. В итоге, чем преград больше и они сложнее, тем больше времени требуется на их преодоление. Необходимость преодоления этих преград при дефиците времени снижает шансы террористов на выполнение террористических угроз в задуманном объеме.

Анализ выявленных тенденций позволил сформулировать цепочку логических зависимостей для оценки риска уязвимости системы¹ (рис. 1).

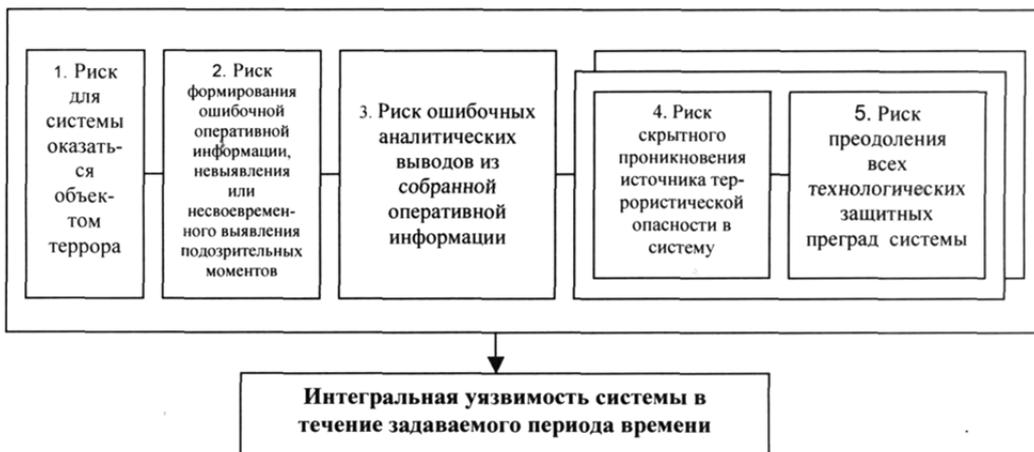


Рис. 1. Цепь логических зависимостей для оценки уязвимости системы

¹ Под системой далее понимаем любой объект социально важного значения, выбранный террористами для атаки.

В качестве основных интегральных показателей предлагаются:

1) интегральная **уязвимость системы в течение задаваемого периода времени** $T_{\text{зад}}$ (количественно оцениваемая как вероятность $P_{\text{уязв}}(T_{\text{зад}})$), зависящая от:

- риска для системы оказаться объектом террора ($P_{\text{объект}}$);
- риска формирования ошибочной оперативной информации, невыявления или несвоевременного выявления подозрительных событий и действий террористов ($P_{\text{подозр}}$);
- риска ошибочных аналитических выводов из собранной оперативной информации и, как следствие, непринятия вовсе или принятия неадекватных мер противодействия ($P_{\text{неадекв}}$);
- риска скрытного внедрения источника террористической опасности в систему ($P_{\text{внедр}}$) и преодоления всех технологических преград защиты, препятствующих реализации террористических угроз в задуманном объеме ($P_{\text{преод}}$);

2) соответствующие риску **потенциальные размеры нанесенного ущерба (С)**. При этом ущерб может быть как материальный, так и нематериальный и оцениваться в различных единицах измерения (в количестве пострадавших взрослых и детей, в стоимости разрушенного имущества, в упущенной потенциальной выгоде и др.).

Для количественной оценки этих показателей используется множество математических моделей [1, 2] и соответствующих исходных данных для расчетов. Все обозначения исходных данных привязаны к обозначениям моделирующих комплексов для оценки уязвимости системы в условиях террористических угроз (программный комплекс «Уязвимость») и качества функционирования информационных систем (КОК) [2].

Для оценки риска оказаться объектом террора ($P_{\text{объект}}$) применима «Модель процессов сбора информации от источников» [2]. Исходными данными при этом выступают:

- среднее время между значимыми изменениями состояния системы с точки зрения притяжения внимания террористов (ξ_i);
- среднее время выявления террористами интересующей их информации (ω_i);
- среднее время доведения интересующей информации до аналитического центра террористов (δ_i), каковым теоретически может оказаться даже террорист-одиночка;
- среднее время принятия решения о привлекательности (приоритетности) системы с точки зрения возможного выбора ее в качестве объекта террора (β_i);
- дисциплина обновления информации в аналитическом центре террористов (D_i):
 - $D_i = D_1$ означает, что сбор информации в аналитическом центре происходит «сразу по происшествии значимого изменения» состояния системы (например, через штатного информатора террористов или через средства массовой информации);
 - $D_i = D_2$ означает, что сбор информации происходит вне явной зависимости от изменения состояний системы (например, случайная утечка информации);
- среднее время (q_i) между обновлениями информации в аналитическом центре террористов (только для дисциплины D_2).

Для количественной оценки риска формирования ошибочной оперативной информации, невыявления или несвоевременного выявления подозрительных событий и действий террористов ($P_{\text{подозр}}$) применима «Модель процессов анализа информации» [2]. Исходными данными при этом являются:

- объем анализируемой оперативной информации (V);
- относительная часть информации о потенциально подозрительных событиях и действиях (μ);
- скорость анализа информации (ν);
- частота ошибок анализа 1-го рода, когда безопасные события и действия воспринимаются как подозрительные (n);
- среднее время наработки на аналитическую ошибку, когда подозрительные события и действия ошибочно игнорируются ($T_{\text{нар}}$);
- период непрерывной работы оператора ($T_{\text{непр}}$);
- задаваемое допустимое время обработки выделенного объема информации ($T_{\text{зад}}$).

Для количественной оценки риска ошибочных аналитических выводов из собранной оперативной информации и, как следствие, непринятия вовсе или принятия неадекватных мер противодействия ($P_{\text{неадекв}}$) применима «Модель процессов анализа информации» [2]. Исходными данными для расчетов выступают:

- объем выявленной информации о подозрительных событиях и действиях (I);
- относительная часть принципиальной информации, объективно имеющей отношение к подготовке террористических актов (μ);
- скорость формирования аналитических выводов и выработки соответствующих мер противодействия (ν);
- частота ошибок анализа 1-го рода, когда безопасные события и действия воспринимаются как имеющие отношение к подготовке террористических актов и требующие применения контрмер (n);
- среднее время наработки на аналитическую ошибку, когда ошибочно пропускаются события и действия, имеющие объективное отношение к подготовке террористических актов ($T_{нар}$);
- период непрерывной работы аналитика ($T_{непр}$);
- задаваемое допустимое время анализа выделенного объема информации ($T_{зад}$).

Для оценки риска скрытного внедрения источника террористической опасности в систему ($P_{внедр}$) и преодоления всех технологических преград защиты, препятствующих реализации террористических угроз в задуманном объеме ($P_{преод}$), предлагаются «Комплекс моделей опасных воздействий на защищаемую систему» и «Комплекс моделей процессов несанкционированного доступа к ресурсам системы» [2]. В рамках одной преграды рассматриваются три технологии обеспечения защищенности от опасных воздействий (подробные описания см. в [3]):

- профилактическая диагностика целостности системы (технология 1);
- многосменный мониторинг безопасности (технология 2);
- мониторинг безопасности с диагностикой целостности системы при каждой смене операторов (технология 3).

В общем случае исходными данными для расчетов выступают:

- частота воздействия на систему, осуществляемого с целью внедрения источника террористической опасности (σ_i);
- среднее время активизации проникшего в систему источника опасности (β);
- время между окончанием предыдущей и началом очередной диагностики целостности системы ($T_{меж}$);
- длительности диагностики, включая приемлемое время восстановления целостности системы ($T_{диаг}$);
- среднее время наработки оператором службы мониторинга безопасности системы на ошибку ($T_{нар}$);
- доверительные уровни защиты по количеству ($m = \overline{1, M}$) и типам технологических барьеров (в зависимости от возможных сценариев реализации террористических угроз) и соответствующие каждому уровню защиты потенциальные ущербы (C_m);
- среднее возможное время преодоления каждого из технологических барьеров (U_m);
- среднее время между сменой значений регулируемых параметров каждого из технологических барьеров (преград) защиты, подлежащих преодолению (f_m);
- среднее время наработки на отказ или замену защитных средств каждого из технологических барьеров (для преград с нерегулируемыми параметрами – $T_{нар.m}$);
- объективная максимально допустимая длительность террористической атаки (h), по истечении которой реализация планов террористов становится невозможной.

В соответствии с предложенной методологией [1, 2] в работе [4] проводятся отдельные оценки уязвимости морских нефтегазодобывающих систем (НГС), позволяющие количественно представить себе масштабы возможного ущерба в результате реализации некоторых из террористических угроз.

Главный вопрос в борьбе с терроризмом заключается в следующем: возможно ли принципиальное решение проблемы своевременного выявления подозрительных событий и действий террористов и безошибочных аналитических выводов из собранной оперативной информации? Попробуем ответить на этот вопрос в приложении к важным системам и объектам. За основу формирования исходных данных для моделирования возьмем данные, характеризующие работу спецслужб США по борьбе с террористами.

В наши дни каждый час только в США совершается 2 млн телефонных разговоров. В сутки вместе с электронной почтой и факсовыми передачами это десятки миллионов сообщений. Многочисленные сайты в Интернете идеально подходят для передачи условной и зашифрованной информации в любой форме представления. Исходя из этого, положим для расчетов объем информации,

подлежащей первоначальному анализу для выявления подозрительных событий и действий террористов, равным 2 и 8 млн условных объектов. Далее положим, что относительная часть информации о потенциально подозрительных событиях и действиях составляет лишь 0,001 %, и вся рутинная работа при этом осуществляется экспертными системами в автоматическом режиме со скоростью анализа от 2 до 100 млн объектов в сутки. Тем не менее время наработки на ошибку такой системы соизмеримо с возможностями человека, обучающего эти системы, и равно 1 сут (т.е. 1 ошибка в сутки) как для ошибок 1-го, так и 2-го рода. Результаты расчетов показывают, что при скорости обработки от 2 до 8 млн объектов в сутки риск формирования ошибочной оперативной информации, невыявления или несвоевременного выявления подозрительных событий и действий террористов в течение суток составит от 0,38 до 0,86, и лишь при увеличении скорости обработки до 100 млн объектов в сутки за счет уменьшения вероятности ошибок 1-го и 2-го рода этот риск снижается до 0,04–0,15.

Сегодня ФБР создало специальный отдел по работе с общественностью для оперативной реакции на предупреждение о возможных атаках или преступлениях. За шесть месяцев центр получил 400 тыс. сообщений по электронной почте, примерно 85 тыс. были признаны серьезными, и информация была передана другим американским спецслужбам для осуществления адекватных контрмер¹. Для проведения расчетов это означает, что объем анализируемой за сутки информации может быть оценен от 2000 до 10 000 сообщений, а относительная часть принципиальной информации, объективно имеющей отношение к подготовке террористических актов, составляет 0,2125 (85 тыс. / 400 тыс.). Перехват сообщений террористов затруднен нерегулярностью связи, краткостью сеансов, неполнотой и иносказательностью сообщений. Так, по признанию американских аналитиков терроризма в администрации США, из 9 тыс. террористических угроз (полученной информации о заговорах, подозрительных действиях, слухах и т.д.) оказалась понятной логика лишь 2,1 % угроз. В остальных случаях спецслужбы терялись в догадках: что же в самом деле затевают террористы? Для расчетов это означает, что при средней скорости анализа 2000 сообщений в сутки среднее суммарное время наработки на ошибку 1-го и 2-го рода будет равно времени анализа 42 сообщений, т.е. около 0,5 часа, аналогичный результат и для скорости 10 000 сообщений в сутки. Как подтверждение этому примечателен такой факт – до 11 сентября агенты ФБР из г. Феникса сообщили о подозрительных арабах, обучающихся в летной школе. Однако эти данные не дошли до сотрудников ФБР в штате Миннесота, которые арестовали Захариуса Муссауи, также обучавшегося в летной школе. Иными словами, не удалось своевременно выявить всех взаимосвязанных подозрительных событий и действий террористов и сделать безошибочные аналитические выводы из собранной оперативной информации.

Анализ результатов расчетов, проведенный на основе вышеприведенных фактических данных, показал, что риск ошибочных аналитических выводов из собранной оперативной информации и, как следствие, непринятия вовсе или принятия неадекватных мер противодействия в течение лишь нескольких часов работы составит выше 0,998 (!), а при увеличении оцениваемого периода до суток и более этот риск практически равен 1. Даже если предположить ошибки в исходных данных на сотни и тысячи процентов, все равно результаты претерпят лишь незначительные изменения. Слишком уж велики объем перерабатываемой информации и частота ошибок 1-го и 2-го рода. Об этом можно было догадываться раньше, но количественные оценки говорят о тщетности надежд на оперативное выявление и предотвращение терактов на самой современной технологической базе. Такое возможно лишь в отдельных случаях удачного стечения обстоятельств.

Результаты расчетов подтверждают, что на нынешнем первоначальном этапе глобального противоборства с терроризмом при несовершенстве механизмов оперативного выявления опасных угроз практически вся тяжесть по снижению уязвимости систем ложится на плечи самих систем. Воистину «спасение утопающих – дело рук самих утопающих». Это на сегодня и ближайшее время – исчерпывающий ответ на поставленный выше вопрос в отношении к важным системам и объектам, чему доказательством служат различные террористические акты, совершаемые террористами в самых неожиданных местах по всему миру.

Таким образом, предупредить превентивно реализацию террористических актов в отношении к любому рода системам и объектам сегодня практически невозможно. Необходима глубоко продуманная целенаправленная работа по коренному снижению рисков.

Анализ показывает, что основным превентивным механизмом снижения рисков является мониторинг обеспечения безопасности в различных вариациях его приложения. Оценим достаточно

¹ Независимое военное обозрение. 2002. № 36.

часто встречающиеся на практике технологии обеспечения безопасности систем, реализующих указанные меры: технологию 1 (профилактическую диагностику целостности системы), 2 (многосменный мониторинг безопасности), 3 (мониторинг безопасности с диагностикой целостности системы при каждой смене операторов).

Технология 1 основана на профилактической диагностике целостности системы. Диагностика осуществляется периодически. Предполагается, что существуют не только средства диагностики, но и способы восстановления необходимой целостности системы при выявлении проникновения источников опасности в систему или следов негативного воздействия. Выявление проникших источников опасности и нарушений целостности возможно лишь в результате диагностики, после чего сразу осуществляется ее восстановление. Опасные воздействия на систему осуществляются поэтапно: сначала источник опасности проникает (внедряется) в систему, а по прошествии свойственного ему периода активизации начинает воздействовать. До активизации проникшего источника опасности функциональная целостность системы не нарушается. Опасность считается реализованной лишь после реального воздействия проникшего источника опасности. Именно с начала такого воздействия целостность системы полагается нарушенной. Таким образом, если сравнивать защищаемую систему с человеком, технология 1 напоминает периодическую диагностику состояния здоровья человека. Если результаты диагностики свидетельствуют о симптомах нарушения здоровья, человека начинают лечить (ликвидировать источник опасности). Между диагностиками проникающая в организм инфекция при активизации до очередной диагностики переводит человека в болезненное состояние (т.е. в результате опасного воздействия целостность нарушается).

В отличие от предыдущей технология 2 подразумевает, что целостность системы в период между диагностиками отслеживают сменяющие друг друга операторы. При обнаружении проникновения источника опасности полагается, что оператор ликвидирует его, восстанавливая целостность системы (способы для этого полагаются существующими аналогично технологии 1). Проникновение источника опасности в систему возможно только в случае ошибки оператора. Безошибочные действия оператора предусматривают нейтрализацию источника опасности при попытке его внедриться в систему (при моделировании морских НГС в рамках рассматриваемых примеров временем нейтрализации будем пренебрегать, хотя в реальности в некоторых случаях такое пренебрежение может оказаться недопустимым). Проверка целостности системы осуществляется лишь при проведении диагностики. При смене операторов такой проверки не делается. То есть источник опасности, проникший в одну смену, может активизироваться в последующие смены вплоть до очередной диагностики. Таким образом, по аналогии с человеком технология 2 напоминает непрерывное пребывание человека на сохранении в госпитале, когда между редкими комплексными диагностиками он непрерывно находится под наблюдением посменно работающих врачей. Между диагностиками сменяемый врач передает пациента сменяющему врачу под «честное слово», т.е. без гарантированного подтверждения реального состояния его «целостности». Такую гарантию, согласно нашим предположениям, может дать лишь комплексная диагностика. Опасная инфекция может проникнуть лишь по вине одного из врачей, а обнаружена существенно позже – либо в результате обострения скрытого заболевания при дежурстве этого или другого врача, либо в результате очередной диагностики состояния здоровья, т.е. при многосменной работе врачей реального виновника, пропустившего инфекцию, в общем случае объективно определить невозможно. Это явный практический недостаток технологии 2.

Технология 3 является частным случаем технологии 2, когда при каждой смене операторов осуществляется комплексная диагностика. Тем самым каждый заступающий на смену оператор уверен в требуемой целостности системы, сохраненной от проникновения источников опасности либо восстановленной по результатам диагностики. Проникновение источника опасности возможно лишь в результате случайной ошибки оператора, причем опасное воздействие происходит только в случае активизации до следующей диагностики. Иначе неактивизировавшийся источник будет обнаружен при диагностике и обезврежен, т.е. технология 3 лишена недостатка технологии 2.

При моделировании для всех трех технологий важным является предположение о полном выявлении источников опасности и существовании применимых способов восстановления нарушенной целостности системы.

На фоне оправдавших себя мер противодействия источникам аварийной опасности ситуация в борьбе с террористическими угрозами оказывается кардинально отличной в худшую сторону, поскольку проблема эффективной борьбы с терроризмом еще находится в самой начальной стадии.

Библиографический список

1. *Бецков, А. В.* Теоретические и организационные основы формирования аэромобильных комплексов МВД России / А. В. Бецков. – Москва : ТЕИС, 2009. – 198 с.
2. *Бецков, А. В.* Формирование и функционирование аэромобильных комплексов МВД России / А. В. Бецков. – Москва : ТЕИС, 2009. – 238 с.
3. *Бецков, А. В.* Модели оценок и снижений рисков на воздушном транспорте / А. В. Бецков. – Москва : ТЕИС, 2004. – 248 с.
4. *Северцев, Н. А.* Введение в безопасность / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : Юрайт, 2018. – 176 с.

References

1. Betskov A. V. *Teoreticheskie i organizatsionnye osnovy formirovaniya aeromobil'nykh kompleksov MVD Rossii* [Theoretical and organizational bases of formation of airmobile complexes of the Ministry of internal Affairs of Russia]. Moscow: TEIS, 2009, 198 p. [In Russian]
2. Betskov A. V. *Formirovanie i funktsionirovanie aeromobil'nykh kompleksov MVD Rossii* [Formation and functioning of airmobile complexes of the Ministry of internal Affairs of Russia]. Moscow: TEIS, 2009, 238 p. [In Russian]
3. Betskov A. V. *Modeli otsenok i snizheniy riskov na vozdushnom transporte* [Models for assessing and reducing risks in air transport]. Moscow: TEIS, 2004, 248 p. [In Russian]
4. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Vvedenie v bezopasnost'* [Introduction to security]. Moscow: Yurayt, 2018, 176 p. [In Russian]

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
отдел управления робототехническими
устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: severs@ccas.ru

Бецков Александр Викторович

доктор технических наук, доцент,
заместитель начальника,
Академия управления МВД России
(Россия, г. Москва,
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)
E-mail: abckov@mail.ru

Лончаков Юрий Валентинович

доктор технических наук,
лётчик-космонавт, Герой России,
помощник руководителя,
Федеральное космическое агентство «Роскосмос»
(Россия, ГСП-6, г. Москва, ул. Щепкина, 42)
E-mail: info@roscosmos.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
department of robotic systems management devices,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Betskov Aleksandr Viktorovich

doctor of technical sciences, associate professor,
deputy chief,
Russian Academy of the Interior Ministry
(8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh street,
Moscow, Russia)

Lonchakov Yuriy Valentinovich

doctor of technical sciences, space pilot,
Hero Of Russia, assistant administrator,
Federal Space Agency «Roskosmos»
(42 Shchepkina street, Moscow, GSP-6, Russia)

Образец цитирования:

Северцев, Н. А. Методологические подходы к выявлению уязвимости социально важных объектов террористическим угрозам / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, Ю. В. Лончаков // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 3–9. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-1.

А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

A. I. Diveev, E. Yu. Shmalko

RESEARCH OF SYNTHESIZED OPTIMAL CONTROL FOR A GROUP OF ROBOTS IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTIES

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается задача группового оптимального управления с фазовыми ограничениями. Для задачи характерно наличие двух видов ограничений: статических и динамических, что значительно усложняет постановку задачи и делает практически невозможным применение фундаментального принципа максимума Понтрягина ввиду колоссальной вычислительной сложности. Возникает необходимость применения численных подходов. *Материалы и методы.* Рассмотрены два альтернативных численных подхода к решению задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями. Сравняется новый метод синтезированного оптимального управления с одним из прямых подходов на основе конечномерной оптимизации на примере решения задачи управления группой мобильных роботов в сложной среде с фазовыми ограничениями. Метод синтезированного оптимального управления основывается на многоточечной стабилизации относительно некоторых оптимально расположенных точек в пространстве состояний. Предполагается, что такой подход, включающий в себя дополнительный этап синтеза системы стабилизации, позволит увеличить надежность работы системы даже при наличии помех или иных малых возмущений. *Результаты.* Представлена численная реализация рассматриваемых методов. Полученные решения исследуются при наличии шума и неопределенностей в модели и начальных условиях. Введение в модель объекта управления случайной составляющей в виде шума показало, что метод синтезированного оптимального управления оказался менее чувствительным к неточностям модели и случайным помехам в начальных условиях. *Выводы.* Особенность метода синтезированного оптимального управления состоит в решении на первоначальном этапе задачи численного синтеза системы управления обратной связи, позволяющей стабилизировать объект управления в некоторой точке пространства состояний. Это позволяет при дальнейшей практической реализации полученного на втором этапе оптимального управления нивелировать небольшие возмущения или неточности модели об-

Abstract. *Background.* The paper considers the problem of optimal control for a group of robots with phase constraints. The problem is characterized by the presence of two types of constraints: static and dynamic, which greatly complicates the formulation of the problem and makes it practically impossible to apply the fundamental Pontryagin's maximum principle in view of colossal computational complexity. There is a need to apply numerical approaches. *Materials and methods.* The article considers two alternative numerical approaches to solving the optimal control problem with phase constraints. A new method of synthesized optimal control is compared with one of the direct approaches based on finite-dimensional optimization using the example of solving the problem of controlling a group of mobile robots in a complex environment with phase constraints. The method of synthesized optimal control is based on multi-point stabilization with respect to several optimally located points in the state space. It is assumed that this approach, which includes an additional stage of the synthesis of the stabilization system, will increase the reliability of the system even in the presence of noise or other small disturbances. *Results.* A numerical implementation of the considered methods is presented. The obtained solutions are investigated in the presence of noise and uncertainties in the model and initial conditions. Addition of a random component in the form of noise into the model of the object showed that the method of synthesized optimal control turned out to be less sensitive to model inaccuracies and random noise in the initial conditions. *Conclusions.* A peculiarity of the synthesized optimal control method consists in solving at the initial stage the problem of numerical synthesis of a feedback control system, which makes it possible to stabilize the control object at some point in the state space. This allows for further practical implementation of the optimal control obtained in the second stage to level out small disturbances or inaccuracies in the model of the control object. In view of the fact that the model of the control object is never known exactly, such an approach seems more reliable and expedient than direct methods from the point of view of applied applications.

екта управления. Ввиду того, что модель объекта управления никогда не известна абсолютно точно, то такой подход представляется более надежным и целесообразным, чем прямые методы, с точки зрения прикладного применения.

Ключевые слова: модель, оптимальное управление с фазовыми ограничениями, принцип максимума Понтрягина, конечномерная оптимизация, пространство состояний, управление обратной связью.

Keywords: model, optimal control with phase constraints, Pontryagin maximum principle, finite-dimensional optimization, state space, feedback control.

Введение

В статье рассматривается задача оптимального управления с фазовыми ограничениями [1, 2]. Основным фундаментальным подходом к ее решению является принцип максимума Понтрягина [3]. Но на практике мы видим, что принцип максимума не так востребован по ряду объективных причин. Сам подход был разработан в 60-х гг. XX в., когда компьютерные технологии сильно отличались от современных и было важно уметь создавать аналитические решения, по крайней мере для задач небольшого размера. Современные тенденции таковы, что компьютерные технологии и численные подходы постепенно вытесняют аналитические.

Также модель объекта управления, для которой инженеры и разработчики решают задачу оптимального управления, как правило, является очень упрощенной версией самого объекта и при переносе на реальный объект результирующая траектория может перестать быть оптимальной.

Особо стоит отметить, что практикующие инженеры не управляют нестабильным объектом. Прежде всего, объекту управления обеспечивается устойчивость, и только тогда задается оптимальная траектория движения. При подходе, основанном на принципе максимума, стабильность нигде не упоминается, и поэтому полученное решение может быть чувствительным даже к небольшим отклонениям в модели, в начальных условиях, при изменении шага интегрирования.

Кроме того, обеспечение устойчивости движения относительно найденной оптимальной траектории изменяет сам объект, добавляя регулятор в модель, и, следовательно, найденная траектория не является оптимальной для новой модели стабилизированного объекта. Этот факт можно отнести к другим известным методам оптимального управления, включая динамическое программирование [4], численные методы нелинейного программирования [5].

Исходя из вышеизложенного, сегодня в огромных возможностях компьютеров применение принципа максимума для решения задачи оптимального управления постепенно теряет свою актуальность и уступает место современным численным подходам [6, 7], которые позволяют решать задачи больших размеров в сложных условиях и с учетом возможных неточностей модели.

В статье представлен подход синтезированного оптимального управления [8], основанный на обеспечении устойчивости объекта с использованием современных численных методов символьной регрессии [9, 10]. В результате синтезированного подхода получен другой тип управления. Такое управление не является внешним воздействием на объект, управление реализовано через внутреннее состояние объекта, точнее положение точки равновесия в пространстве состояний. Следовательно, неточности модели, начальные условия и другие ошибки нивелируются. Единственная трудность – это проблема синтеза [11], которая в настоящее время может быть решена численно методами символьной регрессии.

В данной статье представлено экспериментальное сравнение метода синтезированного управления с наиболее популярным прямым численным методом сведения задачи оптимального управления к нелинейному программированию [12]. Сравнение дается для группы роботов [7, 13], имеющих как динамические, так и статические фазовые ограничения. Проведено исследование полученных управлений в присутствии шумов.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу оптимального управления группой из N роботов с фазовыми ограничениями. Математическая модель объекта управления описывается следующей системой уравнений, включающей случайную компоненту, имитирующую неточность модели:

$$\begin{aligned} \dot{x}_j &= 0,5(u_{1,j} + u_{2,j})\cos(\theta_j) + \beta\xi(t), \\ \dot{y}_j &= 0,5(u_{1,j} + u_{2,j})\sin(\theta_j) + \beta\xi(t), \\ \dot{\theta}_j &= 0,5(u_{1,j} - u_{2,j}) + \beta\xi(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $j=1, \dots, N$, x_j, y_j, θ_j – компоненты вектора состояния группы роботов; $\mathbf{u}_j = [u_{1,j}, u_{2,j}]^T$ – вектор управления группы роботов; β – постоянный положительный параметр; $\xi(t)$ – случайная функция, которая принимает значения от -1 до 1 .

Заданы ограничения на компоненты вектора управления

$$u_i^- \leq u_i^j \leq u_i^+, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, N}, \tag{2}$$

где u_i^-, u_i^+ – заданные значения.

Задано начальное положение каждого робота, включающее случайную компоненту с коэффициентом γ

$$\begin{aligned} x_j(0) &= x_j^0 + \gamma\xi(0), \\ y_j(0) &= y_j^0 + \gamma\xi(0), \\ \theta_j(0) &= \theta_j^0 + \gamma\xi(0), \end{aligned} \tag{3}$$

где γ – заданная положительная константа.

Задано целевое терминальное состояние

$$\begin{aligned} x_j(t_f) &= x_j^f, \\ y_j(t_f) &= y_j^f, \\ \theta_j(t_f) &= \theta_j^f. \end{aligned} \tag{4}$$

Заданы статические фазовые ограничения

$$\varphi_i(x_j, y_j) = r_i^2 - (x_i^* - x_j)^2 - (y_i^* - y_j)^2 \leq 0, \quad j = 1, \dots, N, \tag{5}$$

где r_i, x_i^*, y_i^* – заданные параметры статических фазовых ограничений; $i = 1, \dots, S$, S – количество фазовых ограничений.

Учтем возможные столкновения роботов между собой в виде динамических фазовых ограничений:

$$\psi_{i,k} = d^2 - (x_i - x_k)^2 - (y_i - y_k)^2 \leq 0, \tag{6}$$

где $i = 1, \dots, N-1$, $k = i+1, \dots, N$, d – заданная положительная величина, определяющая максимальный габаритный размер робота.

Задан критерий качества управления, минимизирующий время достижения цели и включающий штрафные функции за отклонение от терминального состояния и за нарушение фазовых ограничений:

$$\begin{aligned} J = t_f + \alpha_1 \left(\sum_{j=1}^N (x_j(t_f) - x_j^f) + \sum_{j=1}^N (y_j(t_f) - y_j^f) + \sum_{j=1}^N (\theta_j(t_f) - \theta_j^f) \right) + \\ + \alpha_2 \left(\int_0^{t_f} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^S \vartheta(\varphi_i(x_j, y_j)) dt \right) + \alpha_3 \left(\int_0^{t_f} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \vartheta(\psi_{i,k}) dt \right) \rightarrow \min, \end{aligned} \tag{7}$$

где t_f – время процесса управления

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \sum_{j=1}^N \delta_j(t) < \varepsilon, \\ t^+ & \text{— иначе,} \end{cases}$$

$$\delta_j(t) = \sqrt{(x_j - x_j^f)^2 + (y_j - y_j^f)^2 + (\theta_j - \theta_j^f)^2},$$

ε – малая положительная величина; t^+ – максимально возможное время управления; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты штрафных функций; $\vartheta(a)$ – функция Хэвисайда

$$\vartheta(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a > 0, \\ 0 & \text{— иначе.} \end{cases}$$

Поставленную задачу (1)–(7) управления решаем с помощью двух подходов (прямого и синтезированного) и исследуем полученные решения на чувствительность к неточностям модели и начальных условий.

Численное решение задачи

Первоначально решим поставленную задачу (1)–(7) методом синтезированного оптимального управления.

Согласно методу [8] сначала стабилизируем объект относительно некоторой точки пространства состояний. Поскольку в рассматриваемой постановке роботы однотипны, решим задачу синтеза системы стабилизации для одного робота и без учета фазовых ограничений (5).

Для численного решения задачи синтеза системы стабилизации используем метод сетевого оператора. При численной реализации были заданы следующие условия: $j=1$, $u^- = -10$, $u^+ = 10$, $x^f = 0$, $y^f = 0$, $\theta^f = 0$, множество начальных условий $X_0 = (x^{0,1} = [-5 \ -5 \ -\pi/2]^T$, $x^{0,2} = [-5 \ -5 \ \pi/2]^T$, $x^{0,3} = [-5 \ 5 \ -\pi/2]^T$, $x^{0,4} = [-5 \ 5 \ \pi/2]^T$, $x^{0,5} = [5 \ -5 \ -\pi/2]^T$, $x^{0,6} = [5 \ -5 \ \pi/2]^T$, $x^{0,7} = [5 \ 5 \ -\pi/2]^T$, $x^{0,8} = [5 \ 5 \ \pi/2]^T$).

В результате были получены следующие функции управления:

$$u_i = \begin{cases} u^+, & \text{если } u_i \geq u^+, \\ u^-, & \text{если } u_i \leq u^-, \ i=1,2, \\ \tilde{u}_i & \text{— иначе,} \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\tilde{u}_1 = A^{-1} + \sqrt[3]{A} + \operatorname{sgn}(q_3(\theta^* - \theta)) \exp(-|q_3(\theta^* - \theta)|) + \operatorname{sgn}(\theta^* - \theta) + \mu(B),$$

$$\tilde{u}_2 = \tilde{u}_1 + \sin(\tilde{u}_1) + \arctan(H) + \mu(B) + C - C^3,$$

$$A = \tanh(0.5D) + \left(B + \sqrt[3]{x^* - x} \right)^3 + C + \sin(q_3(\theta^* - \theta)),$$

$$B = G + \operatorname{sgn}(\operatorname{sgn}(x^* - x)q_2(y^* - y)) \exp(-|\operatorname{sgn}(x^* - x)q_2(y^* - y)|) + \sin(x^* - x) + \tanh(0,5G) + x^* - x,$$

$$C = G + \operatorname{sgn}(\operatorname{sgn}(x^* - x)q_2(y^* - y)) \exp(-|\operatorname{sgn}(x^* - x)q_2(y^* - y)|) + \sin(x^* - x),$$

$$D = H + C - C^3 + \operatorname{sgn}(q_1(x^* - x)) + \arctan(q_1) + \vartheta(\theta^* - \theta),$$

$$G = \operatorname{sgn}(x^* - x)q_2(y^* - y) + q_3(\theta^* - \theta) + \tanh(0,5q_1(x^* - x)),$$

$$H = \arctan(q_1(x^* - x)) + \operatorname{sgn}(W)\sqrt{|W|} + W + V + 2\operatorname{sgn}(W + \tanh(0,5V)) +$$

$$+ \sqrt[3]{W + \tanh(0,5V)} + \sqrt[3]{x^* - x} + \operatorname{sgn}(x^* - x)\sqrt{|x^* - x|} + \sqrt[3]{x^* - x} + \tanh(0,5V),$$

$$W = \text{sgn}(x^* - x) + \text{sgn}(q_2(y^* - y))\text{sgn}(x^* - x)Q,$$

$$V = q_3(\theta^* - \theta) + \text{sgn}(x^* - x)q_2(y^* - y) + Q, \quad Q = \tanh(0,5(x^* - x)),$$

$$\mu(\alpha) = \max\{0, \alpha\}, \quad \tanh(\alpha) = \frac{1 - \exp(-2\alpha)}{1 + \exp(-2\alpha)},$$

$$q_1 = 11,72876, \quad q_2 = 2,02710, \quad q_3 = 4,02222.$$

Полученные функции управления (8), обеспечивающие стабилизацию объекта, подставляем в уравнения модели (1) и далее для получения оптимальных траекторий движения роботов находим K векторов $(\bar{x}^1, \bar{y}^1, \bar{\theta}^1), \dots, (\bar{x}^K, \bar{y}^K, \bar{\theta}^K)$ точек стабилизации.

Для поиска оптимального расположения точек стабилизации используем эволюционный алгоритм роя частиц [14]. В рассматриваемой задаче использовали следующие значения параметров: количество роботов $N = 4$, величина интервала $\Delta t = 0,7$, при максимально допустимом времени управления $t^+ = 2,5$, количество точек стабилизации для каждого робота $K = 3$, количество фазовых ограничений $S = 4$, координаты центра и габаритные параметры ограничений $r_i = 2,5, i = 1, 2, 3, 4$, $x_1^* = 2, y_1^* = 5, x_2^* = 5, y_2^* = 8, x_3^* = 5, y_3^* = 8, x_4^* = 5, y_4^* = 2, d = 2$. Значения искомым компонент векторов точек стабилизации имели следующие ограничения: $\bar{x}_i^+ = 12, \bar{y}_i^+ = 12, \bar{\theta}_i^+ = \pi/2, \bar{x}_i^- = -1, \bar{y}_i^- = -1, \bar{\theta}_i^- = -\pi/2$. Начальные условия для роботов имели следующие значения: $x_0^1 = 0, y_0^1 = 0, \theta_0^1 = 0, x_0^2 = 0, y_0^2 = 10, \theta_0^2 = 0, x_0^3 = 10, y_0^3 = 0, \theta_0^3 = 0, x_0^4 = 10, y_0^4 = 10, \theta_0^4 = 0$, терминальные условия: $x_f^1 = 10, y_f^1 = 10, \theta_f^1 = 0, x_f^2 = 10, y_f^2 = 0, \theta_f^2 = 0, x_f^3 = 0, y_f^3 = 10, \theta_f^3 = 0, x_f^4 = 0, y_f^4 = 0, \theta_f^4 = 0$.

В результате было получено следующее оптимальное решение:

$$\bar{x}^1 = [-0.989, 10.404, -0.535]^T, \quad \bar{x}^2 = [5.998, 5.535, -1.214]^T,$$

$$\bar{x}^3 = [1.572, 0.381, -0.584]^T, \quad \bar{x}^4 = [9.711, 7.629, -0.069]^T,$$

$$\bar{x}^5 = [7.003, 5.010, 0.782]^T, \quad \bar{x}^6 = [5.107, 2.345, 0.148]^T,$$

$$\bar{x}^7 = [7.081, 6.193, -0.035]^T, \quad \bar{x}^8 = [4.613, 3.878, 0.082]^T,$$

$$\bar{x}^9 = [7.009, 4.984, -0.765]^T, \quad \bar{x}^{10} = [9.442, 2.000, -0.184]^T,$$

$$\bar{x}^{11} = [7.776, 2.214, -1.215]^T, \quad \bar{x}^{12} = [7.394, 2.422, -0.465]^T.$$

График траекторий движения всех четырех роботов на плоскости приведен на рис. 1. Значение функционала составило $J = 2,8590$.

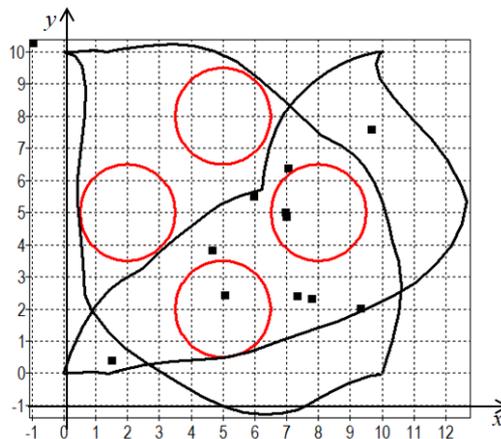


Рис. 1. Оптимальная траектории движения роботов, полученная методом синтезированного оптимального управления

Для сравнения та же самая задача оптимального управления (1)–(7) была решена прямым методом. Управление аппроксимировалось кусочно-линейной функцией на интервалах

$$u_i^j = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } q(t, j, k, \Delta t) \geq u_i^+, \\ u_i^-, & \text{если } q(t, j, k, \Delta t) \leq u_i^-, \\ q(t, j, k, \Delta t) & \text{иначе,} \end{cases} \quad (9)$$

где

$$q(t, j, k, \Delta t) = q_{(i-1)M+k}(i - t / \Delta t) + q_{(i-1)M+k}(t / \Delta t - k + 1),$$

$$k\Delta t \leq t < (k+1)\Delta t, \quad k=1, \dots, M, \quad j=1, \dots, 8, \quad M = \lceil t^+ / \Delta t \rceil.$$

Вектор параметров q имел размерность 88, значение интервала составляло 0,25 с, предельное время процесса управления составляло 2,5 с. Ограничения по параметрам были $-20 \leq q_i \leq 20$, $i=1, \dots, 88$.

В результате оптимизации PSO-алгоритм нашел оптимальное решение со значением функционала $J = 3,6100$. Траектории движения роботов представлены на рис. 2.

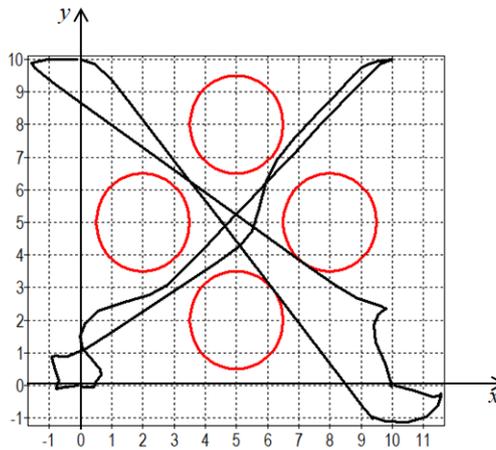


Рис. 2. Оптимальная траектории движения роботов, полученная методом кусочно-линейной аппроксимации и алгоритмом PSO

Как видно из графиков (см. рис. 1, 2), в сложной среде с динамическими и статическими фазовыми ограничениями синтезированный подход работает лучше, чем прямой.

Исследование чувствительности к возмущениям

Теперь исследуем чувствительность полученных решений к возмущениям. Для этого мы моделировали систему с полученными управлениями (8) и (9), увеличив коэффициенты шума β и γ .

Для каждого уровня шума мы сделали 10 тестов, определяющих средние значения функционала (7). Таблица 1 содержит результаты для возмущений в модели, а табл. 2 – для возмущений в начальных условиях. Траектории движения роботов с тем же оптимальным управлением (8) и (9), полученным прямым и синтезированным подходами, но при наличии шума, представлены на рис. 3–6.

Таблица 1

Значения функционала качества для полученных решений в присутствии возмущений в модели

β	Синтезированное управление	Кусочно-линейная аппроксимация
0	2,9840	4,8833
5	3,5094	6,7903
10	3,8064	10,0581

Таблица 2

Значения функционала качества для полученных решений в присутствии возмущений в начальных условиях

γ	Синтезированное управление	Кусочно-линейная аппроксимация
0.1	3,5309	5,2930
0.5	5,7881	9,9566
1	7,1876	11,4535

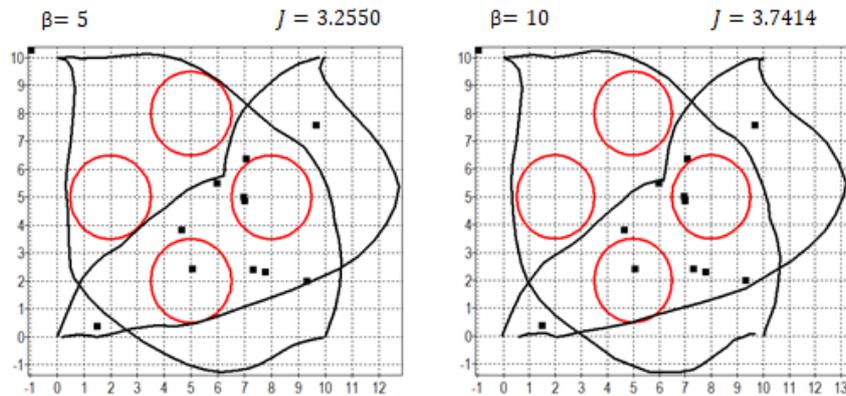


Рис. 3. Оптимальная траектория движения роботов, полученная методом синтезированного оптимального управления, при наличии возмущений в модели объекта управления

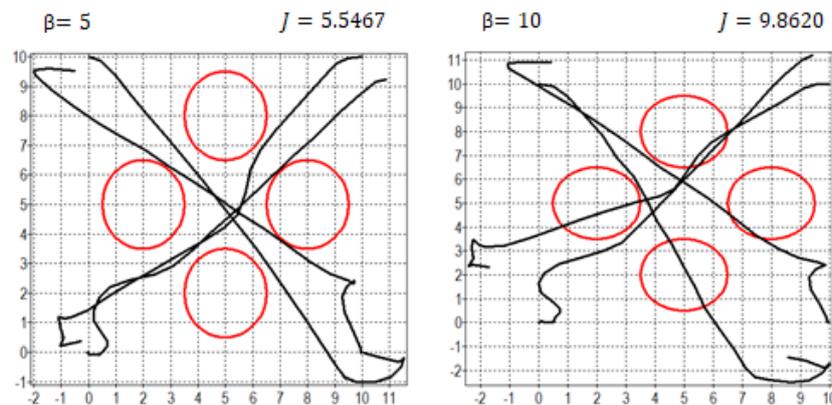


Рис. 4. Оптимальная траектория движения роботов, полученная методом кусочно-линейной аппроксимации и алгоритмом PSO, при наличии возмущений в модели объекта управления

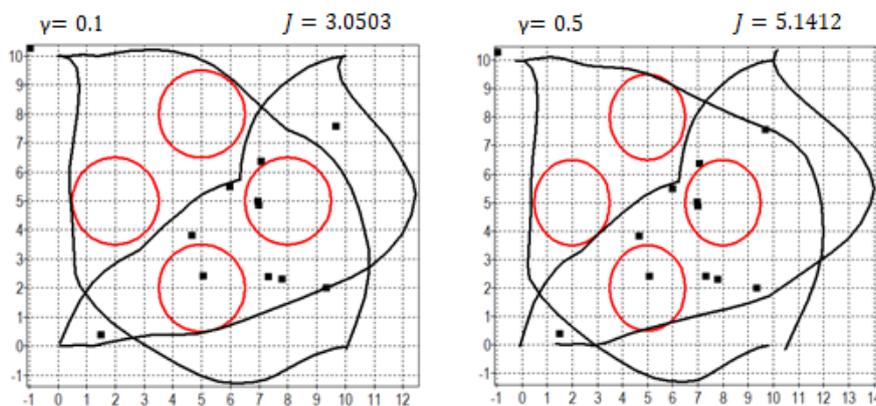


Рис. 5. Оптимальная траектория движения роботов, полученная методом синтезированного оптимального управления, при наличии возмущений в начальных условиях

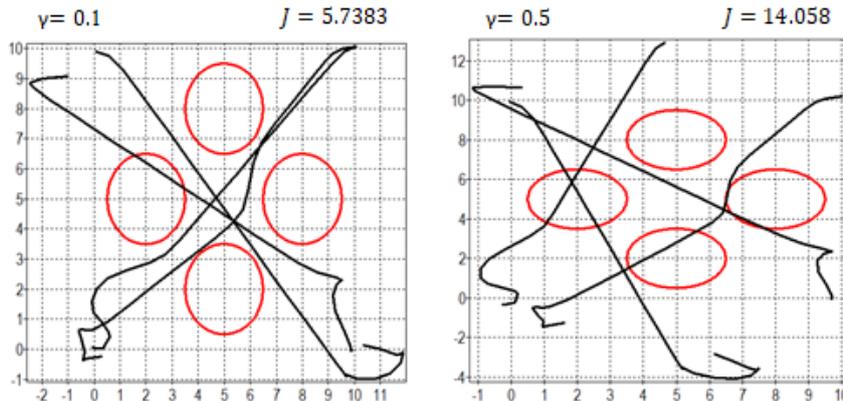


Рис. 6. Оптимальная траектория движения роботов, полученная методом кусочно-линейной аппроксимации и алгоритмом PSO, при наличии возмущений в начальных условиях

Заключение

В заключение мы хотели бы подчеркнуть, что реальный объект всегда отличается от его математической модели. Также в модель объекта вносятся изменения при добавлении разработчиками системы стабилизации. В работе представлено сравнение непрямого подхода к оптимальному управлению на основе синтеза системы стабилизации с прямым методом линейно-кусочной аппроксимации. Исследование полученных управлений на чувствительность к возмущениям показало меньшую чувствительность к возмущениям системы с синтезированным управлением, особенно при возмущениях в начальных условиях. Данные результаты подтверждают предположение о том, что управление стабилизированным объектом дает большую точность отработки управляющих воздействий, обеспечивая высокую надежность работы системы в целом.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 19-11-00258.

Библиографический список

1. Арутюнов, А. В. Условия нормальности принципа максимума при наличии фазовых ограничений / А. В. Арутюнов, Д. Ю. Карамзин // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2019. – № 21. – С. 28–34.
2. Дмитрук, А. В. Аппроксимационная теорема для нелинейной управляемой системы со скользящими режимами / А. В. Дмитрук // Труды МИРАН. – 2007. – Т. 256. – С. 102–114.
3. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – 4-е изд. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 392 с.
4. Bellman, R. E. Dynamic Programming and Feedback Control / R. E. Bellman, R. E. Kalaba // The First International Congress on Automatic in Moscow. – 1960. – P. 16.
5. Квасов, Д. Е. Методы липшицевой глобальной оптимизации в задачах управления / Д. Е. Квасов, Я. Д. Сергеев // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 9. – С. 3–19.
6. Diveev, A. I. Study of the Practical Convergence of Evolutionary Algorithms for the Optimal Program Control of a Wheeled Robot / A. I. Diveev, S. V. Konstantinov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2018. – Vol. 57, № 4. – P. 561–580.
7. Дивеев, А. И. Синтез системы управления группой роботов методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 198.
8. Дивеев, А. И. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 40–47.
9. O'Reilly, U. Genetic Programming: Theory and Practice / U. O'Reilly, T. Yu, R. Riolo, B. Worzel // Genetic Programming Theory and Practice II. Genetic Programming. – Boston, MA : Springer, 2005. – Vol 8. – P. 17–27.
10. Дивеев, А. И. Классические методы символьной регрессии для поиска структур математических выражений (обзор) / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2018. – № 20. – С. 100–132.
11. Gill, P. E. Practical Optimization / P. E. Gill, W. Murray, M. H. Wright. – Academic Press, 1981. – 418 p.
12. Дивеев, А. И. Синтез системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 3–10.

13. Дивеев, А. И. Повышение надежности систем управления группой объектов за счет автоматизации процесса их синтеза / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 160–163.
14. Kennedy, J. Particle Swarm Optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks. – Perth, Australia, 1995. – P. 1942–1948.

References

1. Arutyunov A. V., Karamzin D. Yu. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti system* [Questions of the theory of security and stability of systems]. 2019, no. 21, pp. 28–34. [In Russian]
2. Dmitruk A. V. *Trudy MIRAN* [Works of MIRAN]. 2007, vol. 256, pp. 102–114. [In Russian]
3. Pontryagin L. S., Boltyanskiy, V. G., Gamkrelidze, R. V., Mishchenko, E. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. 4th ed. Moscow: Nauka, Glavnoe redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1983, 392 p. [In Russian]
4. Bellman R. E., Kalaba R. E. *The First International Congress on Automatic in Moscow*. 1960, p. 16.
5. Kvasov D. E., Sergeev Ya. D. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control]. 2013, no. 9, pp. 3–19. [In Russian]
6. Diveev A. I., Konstantinov S. V. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2018, vol. 57, no. 4, pp. 561–580.
7. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 4, p. 198. [In Russian]
8. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4 (24), pp. 40–47. [In Russian]
9. O'Reilly U., Yu T., Riolo R., Worzel B. *Genetic Programming Theory and Practice II. Genetic Programming*. Boston, MA: Springer, 2005, vol 8, pp. 17–27.
10. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti system* [Questions of the theory of security and stability of systems]. 2018, no. 20, pp. 100–132. [In Russian]
11. Gill P. E., Murray W., Wright M. H. *Practical Optimization*. Academic Press, 1981, 418 p.
12. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 4 (8), pp. 3–10. [In Russian]
13. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of The international Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 1, pp. 160–163. [In Russian]
14. Kennedy J., Eberhart R. *Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, Australia, 1995, pp. 1942–1948.

Дивеев Асхат Ибрагимович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
начальник отдела управления
робототехническими устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 42, корп. 2)
E-mail: aidiveev@mail.ru

Шмалько Елизавета Юрьевна

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
отдел управления робототехническими
устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 42, корп. 2)
E-mail: e.shmalko@gmail.com

Diveev Askhat Ibragimovich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher, head of the department
of robotics control,
Federal Research Center “Computer Science
and Control” of the Russian Academy of Sciences
(42/2 Vavilova street, Moscow, Russia)

Shmalko Elizaveta Yurievna

candidate of technical sciences, senior researcher,
department of robotics control,
Federal Research Center “Computer Science
and Control” of the Russian Academy of Sciences
(42/2 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Дивеев, А. И. Исследование синтезированного оптимального управления группой роботов при наличии неопределенностей / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 10–19. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-2.

Д. Ю. Карамзин, Ф. Л. Перейра

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ НОРМАЛЬНОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ ТИПА РАВЕНСТВ И НЕРАВЕНСТВ

D. Yu. Karamzin, F. L. Pereira

INVESTIGATION OF CONDITIONS FOR NORMALITY IN CONTROL PROBLEMS WITH EQUALITY AND INEQUALITY STATE CONSTRAINTS

Аннотация. Работа направлена на исследование условий нормальности принципа максимума Понтрягина для общих задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, в которых фазовые ограничения задаются равенствами и неравенствами. Нормальность доказывается при условии регулярности, сформулированном в терминах предельного нормального конуса к допустимому множеству управления. Нормальность принципа максимума следует из условия регулярности, если одна из конечных точек свободна. При этом рассматривается случай замкнутого управляющего множества. Приводится оценка множителей Лагранжа, отвечающих за фазовые ограничения типа равенств, которая тесно связана со свойством регулярности траектории относительно фазовых ограничений этого типа. Отметим, что задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями играют важную роль в моделировании различных технических процессов и систем.

Ключевые слова: оптимальное управление, принцип максимума, фазовые ограничения.

Abstract. This work aims to investigate conditions for normality of the maximum principle for general state-constrained optimal control problems in which the state constraints are given by equalities and inequalities. Normality is proved under a regularity condition formulated in terms of the limiting normal cone to the feasible control set. The regularity condition implies normality of the maximum principle if one of the end-points is free. In this case, the case of a closed control set is considered. An estimate is given of the Lagrange multipliers responsible for state constraints of the type of equalities, which is closely related to the regularity property of the trajectory with respect to state constraints of this type. We also note that optimal control problems with state constraints play an important role in modeling various technical processes and systems.

Keywords: optimal control, maximum principle, state constraints.

Задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями играют важнейшую роль в моделировании различных технических процессов и систем. Представляется также важным их исследование в рамках теории статистического подобия, сформулированной профессором Н. А. Северцевым [1–3]. Перейдем к точным формулировкам.

Рассмотрим следующую задачу оптимального управления:

$$\begin{aligned} \Phi(p) &\rightarrow \min, \\ \dot{x} &= f(x, u), \\ p &= (x(0), x(1)) \in C, \\ u(t) &\in U \text{ для п.в. } t \in [0, 1], \\ g_1(x(t)) &\leq 0, \quad g_2(x(t)) = 0 \quad \forall t \in [0, 1]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь x – это переменная состояния в R^n , а u – управляющая переменная в R^m . Предположим, что множество C замкнуто, а U компактно. Траектория $x(\cdot)$ является абсолютно непрерывной функцией, такой, что удовлетворяет уравнению $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ для а.а. $t \in [0, 1]$, конечным ограничениям $p \in C$, а также фазовые ограничения $g_1(x(t)) \leq 0$, $g_2(x(t)) = 0 \quad \forall t \in [0, 1]$.

Отображения $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\phi: \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}$ и $g_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{k_i}$, $i=1,2$ предполагаются достаточно гладкими.

Введем понятие регулярности. Рассмотрим допустимый процесс (x^*, u^*) . Обозначим

$$\Gamma_i(x, u, t) = \frac{\partial g_i}{\partial x}(x, t) f(x, u), \quad i=1,2,$$

$$U(x) := \{u \in U : \Gamma_2(x, u) = 0\}.$$

Определение 1. Траектория $x^*(\cdot)$ называется регулярной относительно фазовых ограничений типа равенств, если для всех $t \in [0,1]$ и $u \in U(x^*(t))$ выполняется следующее условие полного ранга:

$$\text{rank} \frac{\partial \Gamma_2}{\partial u}(x^*(t), u) = k_2,$$

$$\text{im} \frac{\partial \Gamma_2}{\partial u}(x^*(t), u) \cap N_U(u) = \{0\}.$$

Здесь $N_U(u)$ означает предельный нормальный конус Мордуховича ко множеству U в точке u .

Обозначим через $U(t)$ замыкание по мере управляющей функции $u^*(t)$. Напомним, что многозначное отображение $U(t)$ определено для $t \in (0,1)$ как множество векторов $u \in \mathbb{R}^m$ таких, что

$$\ell(\{s \in [t-\varepsilon, t+\varepsilon] : u^*(s) \in B_\varepsilon(u)\}) > 0 \quad \forall \varepsilon > 0.$$

Здесь $B_\varepsilon(u) = \{v \in \mathbb{R}^m : |v-u| \leq \varepsilon\}$, а ℓ означает меру Лебега на прямой \mathbb{R} . При $t=0,1$, определим $U(t)$ по непрерывности как верхний топологический предел.

Рассмотрим множество $J(x) := \{j : g_1^j(x) = 0\}$.

Определение 2. Процесс управления $(x^*(t), u^*(t))$ называется внутренне регулярным относительно фазовых ограничений типа неравенств, если существует такое число $\varepsilon_0 > 0$, что для всех $t \in [0,1]$ существует $\delta = \delta(t) > 0$ такое, что для всех $s \in (t-\delta, t+\delta) \cap [0,1]$ и для всех $u \in U(s)$ можно найти единичный вектор

$$d_1 = d_1(t, s, u) \in \ker \frac{\partial \Gamma_2}{\partial u}(x^*(s), u) \cap N_U^\circ(u)$$

такой, что

$$\left\langle \frac{\partial \Gamma_1^j}{\partial u}(x^*(s), u), d_1 \right\rangle < -\varepsilon_0 \quad \forall j \in J(x^*(t)). \quad (2)$$

Процесс называется внешне регулярным относительно фазовых ограничений типа неравенства, если для всех $t \in [0,1]$ существует $\delta = \delta(t) > 0$, такое что для всех $s \in (t-\delta, t+\delta) \cap [0,1]$, $u \in U(s)$ можно найти единичный вектор

$$d_2 = d_2(t, s, u) \in \ker \frac{\partial \Gamma_2}{\partial u}(x^*(s), u) \cap N_U^\circ(u)$$

такой, что

$$\left\langle \frac{\partial \Gamma_1^j}{\partial u}(x^*(s), u), d_2 \right\rangle > \varepsilon_0 \quad \forall j \in J(x^*(t)). \quad (3)$$

Внутренне и внешне регулярный процесс будем называть регулярным относительно фазовых ограничений типа неравенства.

Здесь N_U° обозначает полярный конус к N_U .

Определение 3. Процесс управления $(x^*(t), u^*(t))$ называется внутренне/внешне регулярным относительно фазовых ограничений, если он является внутренне/внешне регулярным относительно фазовых ограничений типа неравенств, в то время как траектория $x^*(t)$ является регулярной относительно фазовых ограничений типа равенств. Внутренне и внешне регулярный процесс будет называться регулярным относительно фазовых ограничений.

Определение 4. Говорят, что выполнены условия управляемости относительно фазовых ограничений в точке $p^* = (x^*(0), x^*(1))$, если для $s = 1, 2$,

$$\begin{aligned} & \exists f_s \in \text{conv } f(x_s^*, U(x_s^*)): \\ & (-1)^s \left\langle \frac{\partial g_1^j}{\partial x}(x_s^*), f_s \right\rangle > 0 \quad \forall j \in J(x_s^*). \end{aligned}$$

Здесь conv означает выпуклую оболочку множества.

Между этими понятиями существует важная связь.

Лемма 1. Внутренне регулярный относительно фазовых ограничений процесс управления подразумевает условие управляемости при $s = 1$, в то время как внешне регулярный относительно фазовых ограничений процесс управления подразумевает условие управляемости при $s = 2$. Таким образом, регулярность процесса управления относительно фазовых ограничений влечет условия управляемости относительно фазовых ограничений в конечной точке.

Фазовые ограничения согласованы с конечными ограничениями, если

$$C \subseteq G \times G,$$

где

$$G := \{x \in \mathbb{R}^n : g_1(x) \leq 0, g_2(x) = 0\}.$$

Согласованность ограничений не является обременительным требованием. Очевидно, что ее всегда можно достичь, заменив множество C на множество $C \cap (G \times G)$. Поэтому в дальнейшем предполагается, что C вложено в фазовое множество $G \times G$.

Рассмотрим расширенную функцию Гамильтона – Понтрягина [4],

$$\bar{H}(x, u, \psi, \mu) := \langle \psi, f(x, u) \rangle - \langle \mu, \Gamma(x, u) \rangle,$$

где $\psi \in \mathbb{R}^n$, $\mu = (\mu_1, \mu_2)$, $\mu_i \in \mathbb{R}^{k_i}$ и $\Gamma = (\Gamma_1, \Gamma_2)$.

Определение 5. Будем говорить, что процесс управления (x^*, u^*) удовлетворяет принципу максимума, если существуют множители Лагранжа: число $\lambda \geq 0$, абсолютно непрерывная вектор-функция $\psi \in W_{1,\infty}([0, 1]; \mathbb{R}^n)$, покомпонентно убывающая вектор-функция ограниченной вариации $\mu_1 \in BV([0, 1]; \mathbb{R}^{k_1})$ и измеримая вектор-функция $\mu_2 \in L_\infty([0, 1]; \mathbb{R}^{k_2})$ такая, что выполняются следующие условия:

– условие нетривиальности

$$\lambda + \sum_{j=1}^{k_1} \text{Var} \mu_1^j(t) \Big|_0^1 + \text{dist}(\psi(t) - \mu_1(t) \frac{\partial g_1}{\partial x}(x^*(t)), \text{im} \frac{\partial g_2^*}{\partial x}(x^*(t))) > 0 \quad \forall t \in [0, 1];$$

– сопряженное уравнение

$$\dot{\psi}(t) = -\frac{\partial \bar{H}}{\partial x}(x^*(t), u^*(t), \psi(t), \mu(t)) \text{ для п.в. } t \in [0, 1];$$

– условия трансверсальности

$$(\psi(0) - \mu_1(0) \frac{\partial g_1}{\partial x}(x_0^*), -\psi(1) + \mu_1(1) \frac{\partial g_1}{\partial x}(x_1^*)) \in \lambda \frac{\partial \phi}{\partial p}(p^*) + N_C(p^*);$$

– условие максимума

$$\max_{u \in U(x^*(t))} \bar{H}(x^*(t), u, \psi(t), \mu(t)) = \bar{H}(x^*(t), u^*(t), \psi(t), \mu(t)) \text{ для п.в. } t \in [0, 1];$$

– закон сохранения энергии $\exists c \in \mathbf{R} : M(t) = c \quad \forall t \in [0, 1]$, где

$$M(t) := \max_{u \in U(x^*(t))} \bar{H}(x^*(t), u, \psi(t), \mu(t));$$

– условие Эйлера – Лагранжа

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial u}(x^*(t), u^*(t), \psi(t), \mu(t)) \in \text{conv} N_U(u^*(t));$$

– условие дополняющей нежесткости $\int_0^1 \langle g_1(x^*(t)), d\mu_1(t) \rangle = 0$.

Кроме того, справедлива следующая оценка множителей. Существует такое число $\kappa > 0$, что

$$|\mu_2(t) + \xi| \leq \kappa \cdot |\psi(t) - \mu_1(t) \frac{\partial g_1}{\partial x}(x^*(t)) + \xi \frac{\partial g_2}{\partial x}(x^*(t))| \quad (4)$$

для п.в. $t \in [0, 1]$ и для всех $\xi \in \mathbf{R}^{k_2}$.

Приведем небольшой комментарий. В то время как условие нетривиальности, сопряженное уравнение, условие трансверсальности, условие максимума, закон сохранения, включение Эйлера – Лагранжа и условие дополнительной нежесткости достаточно хорошо известны, оценка (4) является новой и, кроме того, является существенной частью принципа максимума. Эта оценка множителей тесно связана со свойством регулярности относительно фазовых ограничений типа равенств и тем, что рассматривается случай просто замкнутого множества U . Обратим внимание, что эту оценку не получится вывести из условия Эйлера – Лагранжа из-за выпуклени нормального конуса, и поэтому она доказывается отдельно. Когда множество U выпукло, оценка (4) не нужна.

Рассмотрим следующие замечания.

Замечание 1. Наряду с набором множителей Лагранжа (λ, ψ, μ) условия принципа максимума также удовлетворяются следующим набором множителей Лагранжа:

$$\left(\lambda, \psi(t) + a \frac{\partial g}{\partial x}(t), \mu(t) + a \right),$$

где $g = (g_1, g_2)$, a – произвольный вектор из \mathbf{R}^k , $k = k_1 + k_2$.

Замечание 2. Функция $\mu_1^j(t)$ постоянна на любом временном интервале $[a, b]$, на котором $g_1^j(x^*(t)) < 0 \quad \forall t \in [a, b]$.

Замечание 3. Закон сохранения энергии не является полностью независимым условием, поскольку следующую его часть легко извлечь из остальных условий принципа максимума, а именно, из условия максимума, сопряженного уравнения и монотонности множителя меры μ_1 :

$$\exists c \in \mathbf{R} : M(t) = c \quad \forall t \in (0, 1), \quad M(0) \geq c, \quad M(1) \geq c.$$

Остальная часть закона о сохранении энергии представляет собой истинные (независимые) условия оптимальности:

$$M(0) \leq c, M(1) \leq c,$$

которые можно рассматривать как условия трансверсальности по отношению к ограничениям времени: $t \geq 0$ и $t \leq 1$, если считать время как фазовую переменную, а гамильтониан (энергию) – соответственно как сопряженную ко времени функцию.

Утверждение принципа максимума заключается в следующем.

Теорема 1. *Предположим, что процесс управления (x^*, u^*) является оптимальным в задаче (1). Если траектория $x^*(t)$ является регулярной относительно фазовых ограничений типа равенств, то процесс (x^*, u^*) удовлетворяет принципу максимума.*

Доказательство этого утверждения может быть найдено в работах [5, 6].

Основной результат нашей работы заключается в следующей теореме.

Теорема 2. *Предположим, что процесс управления (x^*, u^*) является оптимальным в задаче (1). Предположим, что (x^*, u^*) является регулярным относительно фазовых ограничений, в то время как правая конечная точка свободна, что означает, что $C = C_0 \times G$ для некоторого замкнутого множества $C_0 \subseteq G$. Тогда процесс управления (x^*, u^*) удовлетворяет принципу максимума, причем $\lambda > 0$. Аналогично, если (x^*, u^*) является регулярным относительно фазовых ограничений и левая конечная точка свободна, что означает, что $C = G \times C_1$ для некоторого замкнутого множества $C_1 \subseteq G$, то процесс управления (x^*, u^*) удовлетворяет принципу максимума при $\lambda > 0$.*

Доказательство см. в работе [7].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-11-00258).

Библиографический список

1. Северцев, Н. А. Статистическая теория подобию в задачах безопасности и надежности динамических систем / Н. А. Северцев. – Москва : Радиотехника, 2016. – 399 с.
2. Северцев, Н. А. Введение в безопасность : учеб. пособие / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2019. – 177 с.
3. Северцев, Н. А. Адаптивная модель оценки безопасности и надежности программного обеспечения / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 19–28.
4. Pontryagin, L. S. The Mathematical Theory of Optimal Processes / L. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze, E. F. Mishchenko. – New York : Interscience, 1962. – 360 p.
5. Arutyunov, A. V. Non-degenerate necessary optimality conditions for the optimal control problem with equality-type state constraints / A. V. Arutyunov, D. Yu. Karamzin // Journal of Global Optimization. – 2016. – Vol. 64 (4). – P. 623–647.
6. Arutyunov, A. V. The Maximum Principle for Optimal Control Problems with State Constraints / A. V. Arutyunov, D. Yu. Karamzin, F. L. Pereira // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2011. – Vol. 149 (3). – P. 474–493.
7. Arutyunov, A. V. Necessary Optimality Conditions for Problems with Equality and Inequality Constraints: Abnormal Case / A. V. Arutyunov, D. Y. Karamzin, F. L. Pereira // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2009. – Vol. 140:3. – P. 391–408.

References

1. Severtsev N. A. *Statisticheskaya teoriya podobiya v zadachakh bezopasnosti i nadezhnosti dinamicheskikh sistem* [Statistical similarity theory in security and reliability problems of dynamical systems]. Moscow: Radiotekhnika, 2016, 399 p. [In Russian]

2. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Vvedenie v bezopasnost': ucheb. posobie* [Introduction to safety : textbook]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Yurayt, 2019, 177 p. [In Russian]
3. Severtsev N. A., Betskov A. V., Dar'ina A. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4 (24), pp. 19–28. [In Russian]
4. Pontryagin L. S., Boltyanskii V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. New York: Interscience, 1962, 360 p.
5. Arutyunov A. V., Karamzin D. Yu. *Journal of Global Optimization*. 2016, vol. 64 (4), pp. 623–647.
6. Arutyunov A. V., Karamzin D. Yu., Pereira F. L. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2011, vol. 149 (3), pp. 474–493.
7. Arutyunov A. V., Karamzin D. Y., Pereira F. L. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2009, vol. 140:3, pp. 391–408.

Карамзин Дмитрий Юрьевич

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 42, корп. 2)
E-mail: dmitry_karamzin@mail.ru

Перейра Фернандо Лобо

кандидат математических наук,
директор SYSTEC/FEUP,
Университет Порту
(Португалия, г. Порту)
E-mail: flp@fe.up.pt

Karamzin Dmitriy Yur'evich

doctor of physical and mathematical sciences,
leading researcher,
Federal Research Center “Computer Science
and Control” of the Russian Academy of Sciences
(42/2 Vavilova street, Moscow, Russia)

Pereira Fernando Lobo

Ph.D in mathematics,
Director of SYSTEC/FEUP,
University of Porto
(Porto, Portugal)

Образец цитирования:

Карамзин, Д. Ю. Исследование условий нормальности в задачах управления с фазовыми ограничениями типа равенств и неравенств / Д. Ю. Карамзин, Ф. Л. Перейра // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 20–25. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-3.

Н. А. Северцев, А. В. Бецков, И. В. Прокопьев

СИСТЕМНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ

N. A. Severtsev, A. V. Betskov, I. V. Prokop'ev

SYSTEM PRESENTATION OF SECURITY CONCEPT

Аннотация. Выбранный в статье подход с позиции системного анализа демонстрирует методологию создания теории безопасности с учетом воздействия субъекта на работу исследуемого объекта внутренних и внешних возмущений. Продемонстрированы в качественном виде показатели безопасности в пространстве состояний, а также методы построения схем формирования оценки безопасности на основе информации и деформации параметрической области безопасности при различных возмущениях. Данный подход применим для обоснования методологии безопасности робототехнических систем и аэромобильных комплексов, в том числе обладающих искусственным интеллектом.

Ключевые слова: системный анализ, робототехнические системы, аэромобильные комплексы, искусственный интеллект, обобщенное понятие опасности, оценка безопасности системы, показатель безопасности, модифицированная граница, многоальтернативность, бифуркационные изменения, деформация параметрической области безопасности.

Abstract. The approach chosen in the article, from the point of view of system analysis, demonstrates the methodology for creating a security theory taking into account the influence of the subject on the work of the object under study of internal and external disturbances. Safety indicators in the state space are demonstrated in a qualitative form, as well as methods for constructing schemes for forming a safety assessment based on information and deforming the parametric safety domain under various perturbations. This approach is applicable to substantiate the safety methodology of robotic systems and airmobile complexes, including those with artificial intelligence.

Keywords: system analysis, robotic systems, airmobile complexes, artificial intelligence, generalized concept of hazard, system safety assessment, safety indicator, modified boundary, multi-alternative, bifurcation changes, deformation of the parametric safety domain.

Многие ученые признают необходимость формирования единой терминологической и понятийной научной базы. Тем не менее приходится признать, что до сих пор терминологии обобщенной безопасности для различных отраслей науки и техники нет, особенно в формализованной постановке. Есть понятие безопасности систем для каждой отрасли научных знаний, хозяйствования и в философском понимании – вербальном представлении, которое трактуется применительно к какому-либо объекту (системе), принадлежащему той или иной отрасли. Данная статья посвящена обобщенному понятию опасности, независимо от принадлежности исследуемой системы (объекта). Своего рода унифицированный подход описания опасного или безопасного состояния на формализованной основе.

Пусть имеется система, на которую действуют внешние и внутренние возмущения при управлении данной системой. Весь спектр этих случайных воздействий может привести систему к разрушению. Задача состоит в том, чтобы построить оценки, позволяющие в процессе работы системы численно определить угрозу распада системы для своевременного принятия мер к недопущению этого. Очевидно, такая оценка должна быть построена на движении системы, т.е. представлять функционал, так как изменяющееся состояние системы может нести в себе информацию о приближении опасного порога функционирования системы.

Принципиальная схема формирования показателя безопасности J_6 на основе всех информационных потоков представляется следующим образом (рис. 1).

Например, увеличивающаяся амплитуда колебаний (качки) водного судна выше пределов устойчивости позволяет судить об угрозе его опрокидывания, т.е. когда центр тяжести (центр масс) окажется выше центра величины, т.е. центра гидростатического давления. В этом примере катастрофа (опрокидывание водного) будет являться результатом изменения его состояния, а не причины, его вызвавшей.

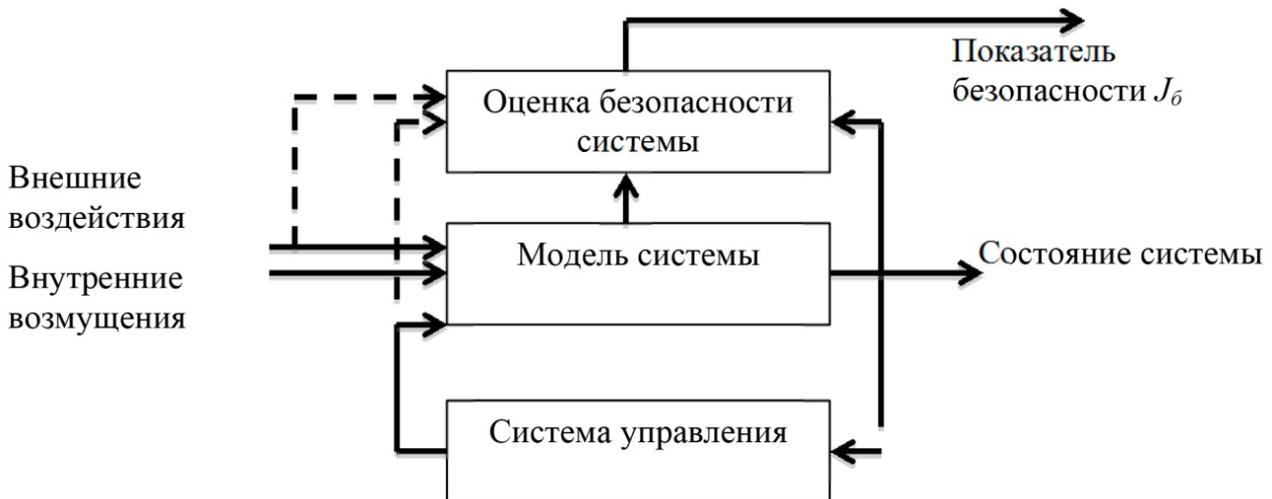


Рис. 1. Схема формирования оценки безопасности на основе информации

Следовательно, все пространство состояний системы можно разделить на две области: одна будет составлять множество опасных для существования системы состояний C_0 , а другой будут принадлежать все безопасные состояния $C_б$. Объединение этих множеств опишет все возможные состояния системы ($C = C_0 \cup C_б$). Надо выделить две противоречивые тенденции при построении $C_б$. С одной стороны, чтобы гарантировать безопасность системы из этого множества следует исключить все режимы, которые могли бы приводить к ее деструкции, что означает – множество надо сужать. Но ограничение допустимых состояний стесняет возможности функционирования, следовательно, уменьшает возможности достижения целевого множества. Преодоление противоречия осуществляется поиском компромисса. В этом случае следует искать в удалении от границы безопасности, т.е. уменьшать область безопасности – наличие некоторого запаса безопасности и предоставить ЛПР время на парирование угроз, а также повысить уровень защищенности. Такой подход можно определить следующим образом: объективную оценку безопасности системы можно произвести, наблюдая ее состояние. Для этого следует построить подмножество безопасных состояний, выделив все режимы, приводящие к разрушению (потере гомеостаза) системы. Строго говоря, область безопасности может быть сформирована на основе полномасштабного моделирования работы системы с управлением в реальных условиях и действия на нее всевозможных возмущений. Для сохранения гомеостаза системы необходимо создать запас безопасности, введение которого обеспечивает уменьшение области безопасности.

Однако даже если построена модифицированная граница области безопасности с учетом запаса $\Gamma_{бм}$, то находить в пространстве C кратчайшее расстояние от текущего состояния системы, задаваемого вектором C , до границы $\Gamma_{бм}$ представляется затруднительным.

Во-первых, наличие модифицированной области $C_{бм}$ в пространстве состояний наиболее объективно свидетельствует об удаленности текущего режима работы системы от состояния, угрожающего его целостности. Однако для повышения временного ресурса для устранения неполадок в системе, для увеличения оперативности и качества управления было бы желательно располагать информацией о причинах, обуславливающих приближение состояния системы к опасной границе. Для этого рассмотрим факторы, определяющие появление опасных для системы режимов, т.е. требуется сделать анализ угроз, проникающих через единственный канал – через воздействие на систему. Например, лучше сделать профилактику судна «Булгария», выяснить все причины неполадок и устранить их, чем выходить в плавание с этими не устраненными неполадками (а их было много), дожидаться оверкиля судна с большими жертвами.

Во-вторых, необходимо определить показатели безопасности, имеющие большую физическую наглядность и меньшую сложность вычислений, нежели определение в пространстве состояний расстояния до границы (рис. 2).

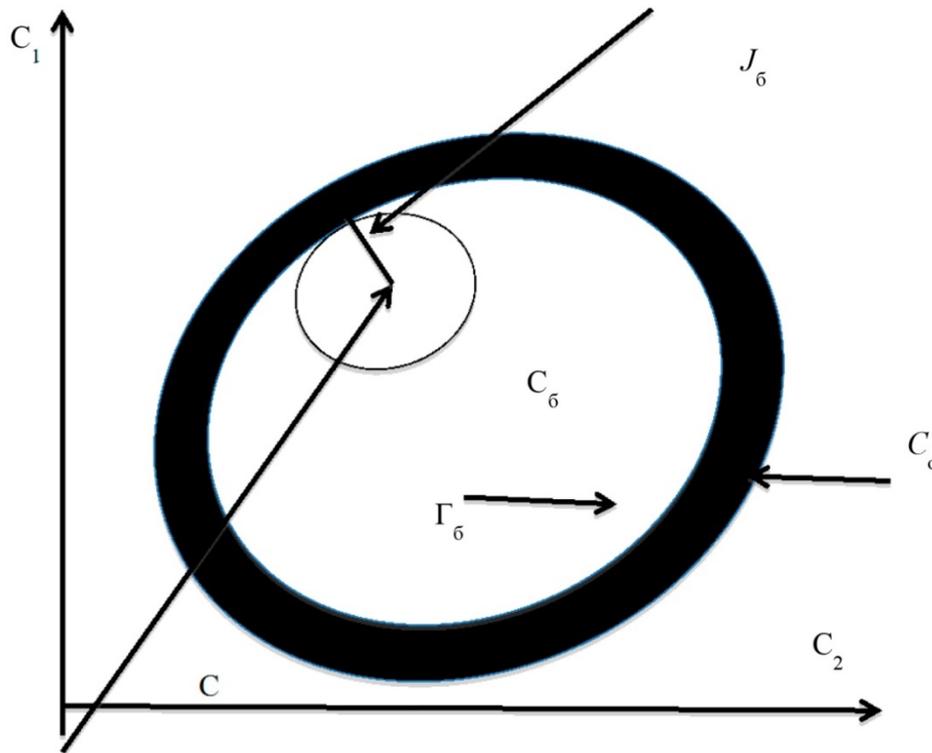


Рис. 2. Показатель безопасности в пространстве состояний

Решение первой задачи базируется на рис. 1. Если раньше область безопасности строилась на основе информации о состоянии (выход модели), то теперь следует привлекать сведения о входных воздействиях, т.е. использовать каналы, изображенные пунктирными линиями. Это воздействия управления, внешние и внутренние воздействия. Подробный разбор этих воздействий – это отдельные темы. Однако мы их изложим в кратком и основополагающем представлении. Итак, внутренние возмущения включают в себя изменения каналов передачи информации (структурные трансформации) и отклонения параметров от номинальных значений (параметрические возмущения). Неожиданная реорганизация структуры является самой опасной, так как особенно сильно влияет на динамическое состояние системы. Предвидеть подобные преобразования в самоорганизующихся системах весьма сложно в силу их многоальтернативности и малой предсказуемости; такая задача имеет характер бифуркационных изменений. В искусственно созданных системах структура мало подвержена внезапным преобразованиям, так как они есть результат синтеза системы, воплощенного в реальность совокупностью технических решений, направленных именно на поддержание целостности системы. Что касается управлений как целенаправленных воздействий на динамику системы, то в искусственных системах они идентифицируются просто. В естественных системах понятие управления часто размыто. Тогда напрашивается вывод о том, что основную проблему при построении оценки безопасности доставляют параметрические возмущения и внешние воздействия среды. Итак, будем исходить из предположения, что область безопасности S_{6M} построена. Тогда задача заключается в пересчете этого подпространства пространства состояний в пространство входных воздействий – параметрических S_{6M}^n и внешних S_{6M}^b возмущений. Однако такое решение затруднительно, так как из реакций системы трудно выделить их причинную обусловленность, т.е. установить вклад каждого возмущения в результат – состояние. Поэтому приходится обойтись без процедуры общего пересчета, а по отдельности строить области для каждого входного воздействия. Методически это заключается в нахождении соответствия границы Γ_{6M} множества S_{6M} границам в пространствах параметров и воздействия внешней среды, соответственно Γ_{6M}^b и Γ_{6M}^n . Перебирается весь спектр воздействий, например методом Монте-Карло, и находится реакция системы на каждый входной сигнал. Те сигналы, которые приводят к распаду системы, и признаются опасными.

Сложность процедуры усугубляется еще одним обстоятельством: в общем случае динамических нелинейных систем существует взаимная корреляционная зависимость области нормального

функционирования системы от параметрических и внешних возмущений. Грубо говоря, для каждого уровня внешних воздействий имеется свое множество допустимых значений параметров системы (рис. 3).

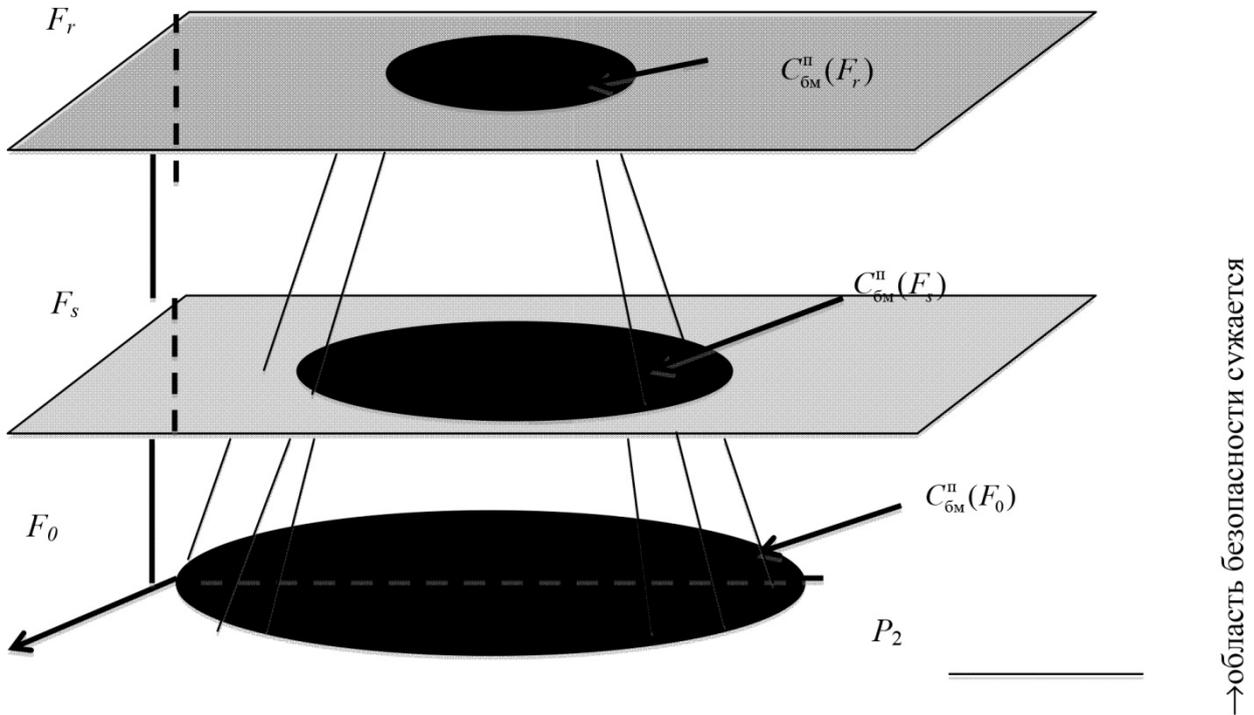


Рис. 3. Деформация параметрической области безопасности при различных возмущениях

Горизонтальная плоскость (рис. 3) есть множество параметров $P = \{P_i\}, i = 1, 2$, где выделена область безопасности $C_{бм}^n$. По ординате отложена величина уровня внешних возмущений F с тремя координатами-воздействиями F_0, F_s, F_r . Для разных уровней возмущений область $C_{бм}^n$ меняется, т.е. становится их функцией. Можно предположить, что по мере роста воздействий на систему параметрическая область безопасности сужается. Таким образом, в результате построений мы располагаем двумя наборами взаимосвязанных множеств: областями безопасности $C_{бм}^b$ и $C_{бм}^n$, построенными в пространстве входных воздействий и флуктуирующих параметров соответственно. Тем самым при оценке безопасности можно перейти от изучения состояний системы к наблюдению за выходными сигналами, а значит, заменить анализ следствия анализом причин. Обращение непосредственно к угрозам, исходящим от среды и нарушений в системе привело к размножению областей безопасности. Вместо итоговой области в пространстве состояний мы вынуждены иметь дело с несколькими областями по числу каналов проникновения угроз в систему, да к тому же области связаны функционально. Конечно, это делает алгоритмы обеспечения безопасности более сложными.

Мы рассмотрели решение первой задачи. Теперь перейдем ко второй.

1. Нарушение устойчивости системы означает появление в ней расходящихся процессов, которые не поддаются управлению и немедленно приводят к дезинтеграции системы. Существует общий подход к исследованию устойчивости на результатах А. М. Ляпунова, от которого трудно ожидать непосредственной применимости к проблеме безопасности в силу отсутствия возможности получения конкретных оценок. Развитие метода показало, что его эффективное использование требует разбиения общей задачи на классы, а наиболее продвинутыми оказались решения частных задач с вполне конкретными видами нелинейностей.

Нарушение устойчивости не столь очевидно, но имеет губительные последствия. Поэтому при определении безопасности режимов работы системы следует уделять внимание и устойчивости. Тогда границы Γ_6^b и Γ_6^n областей безопасности будут описывать нарушение условий устойчивости системы при превышении уровня допустимых внешних воздействий и запредельном отклонении па-

раметров системы. Мера безопасности как гарантия устойчивости определяется посредством оценки удаления текущего состояния системы от границы, описывающей переход в неустойчивое состояние (рис. 2). Однако в настоящее время не существует общих методов построения областей устойчивости в пространствах воздействий и параметров, которые были бы адекватными областями безопасности. Это обстоятельство ставит под сомнение возможность разработки общей конструктивной теории безопасности, по крайней мере, при современном уровне теории устойчивости в безопасности функционирования системы. Выход из указанного затруднения лежит на пути декомпозиции проблемы, разбиения общей задачи на ряд частных. Иначе, если не удастся построить теорию безопасности для всех типов систем, то необходимо решать задачи для систем отдельных классов или в худшем случае ограничиться отысканием частных решений для конкретного вида систем, оценка устойчивости которых известна. Действительно, при изучении системы на безопасность, всегда можно выстроить приоритеты факторов по их влиянию на ее безопасность. Тогда в последующих исследованиях устойчивости можно принимать во внимание только наиболее критичные, для которых и вычислять области допустимых значений.

2. Управляемость системы по своей содержательности сходна с понятием области достижимости. Оба характеризуют достижение цели. Для линейных систем условие управляемости известно. Для нелинейных систем это условие сопряжено с большими трудностями. С практической точки зрения достижение цели требует:

а) того, чтобы управляющие органы могли воздействовать на параметры состояния, в которых фиксируется цель;

б) того, чтобы было достаточно ресурсов для движения по траектории, проходящей через цель. Эти соображения имеют ясную физическую наглядность, что позволяет выполнить их при создании системы;

в) требование наблюдаемости системы состоит в доступности измерений степеней свободы, информация о которых необходима для управления системой. Выполнение этого требования на практике осуществляется путем создания измерителей, достаточных для идентификации состояний и управления движением системы;

г) ресурсное обеспечение обычно удовлетворяется на стадии проектирования или подготовки системы к выполнению конкретной задачи. Повышение их порогового значения приводит к ухудшению экономических показателей. Однако таким ущербом можно пренебречь по сравнению с угрозой разрушения системы, поэтому на него идут сознательно.

Заключение

1. Для построения оперативной системы мер по недопущению превращения угроз в катастрофические (аварийные) для системы целесообразно использовать информацию о входных воздействиях со стороны среды и отклонениях параметров системы. Это позволяет подвергнуть анализу не следствия (опасные изменения состояния), а причины появления угрожающих состояний. Однако такой путь связан с усложнением системы, как в алгоритмическом смысле, так и информационном – требуются сведения об угрозах существованию системы. Можно ожидать, что объединение информационных потоков о состоянии, системах и причинах его изменения даст наилучшие результаты, как по позиций простоты реализации, так и эффективности системы обеспечения безопасности.

2. Из числа доступных анализу характеристик динамики системы пригодны для оценки безопасности показатели управляемости, наблюдаемости и устойчивости, а также энергетические ресурсы. Большинство из них достаточно просто удовлетворяется при проектировании или подготовке системы к работе, поэтому их можно не учитывать при анализе безопасности системы. Исключением можно считать устойчивость, оценка которой изменяется при воздействиях со стороны внешней среды и внутренних возмущениях. Эту характеристику следует использовать при построении области безопасности.

3. Применение оценки устойчивости в качестве показателя безопасности в общем случае затруднительно, что приводит к необходимости подвергать анализу на безопасность отдельные классы или только конкретные системы. Для построения области безопасности по критерию устойчивости и ее использования при контроле целесообразно применять упрощение модели системы. Упрощение рационально проводить путем выявления критических угроз и/или их объединения

в эталонные группы; отказа от непрерывной модели системы и перехода к конечным зависимостям между воздействиями и реакциями системы.

Библиографический список

1. *Могилевский, В. Д.* Основы теории систем : в 2 ч. / В. Д. Могилевский. – Москва : МИРЭА, 1997. – Ч. 1. Проблемы формализации динамических систем. – 75 с. ; Ч. 2. Гамильтоново представление движения систем. – 115 с.
2. *Северцев, Н. А.* Введение в безопасность / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : ВЦ РАН им. А. А. Дородницына, 2018. – 176 с.
3. *Северцев, Н. А.* Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2018. – 452 с.

References

1. Mogilevskiy V. D. *Osnovy teorii sistem: v 2 ch.* [Fundamentals of systems theory: in 2 parts]. Moscow: MIREA, 1997, part 1, 75 p.; part 2, 115 p. [In Russian]
2. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Vvedenie v bezopasnost'* [Introduction to security]. Moscow: VTs RAN im. A. A. Dorodnitsyna, 2018, 176 p. [In Russian]
3. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Sistemnyy analiz teorii bezopasnosti* [A systematic analysis of the theory of security]. Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova, 2018, 452 p. [In Russian]

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
отдел управления робототехническими
устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: severs@ccas.ru

Бецков Александр Викторович

доктор технических наук, доцент,
заместитель начальника,
Академия управления МВД России
(Россия, г. Москва,
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)
E-mail: abckov@mail.ru

Прокопьев Игорь Витальевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: fvi2014@list.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
department of robotic systems management devices,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Betskov Aleksandr Viktorovich

doctor of technical sciences, associate professor,
deputy chief,
Russian Academy of the Interior Ministry
(8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh street,
Moscow, Russia)

Prokop'ev Igor' Vital'evich

doctor of technical sciences, leading researcher,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Северцев, Н. А. Системное представление методологии безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, И. В. Прокопьев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 26–31. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-4.

С. Н. Кудрявцев

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРНОЗНАЧНЫХ ФУНКЦИЙ
ПО ЗНАЧЕНИЯМ НА НИХ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ**

S. N. Kudryavtsev

**RESTORATION OF VECTOR-VALUED FUNCTIONS
BY VALUES AT THEIR LINEAR FUNCTIONALS**

Аннотация. Для класса векторнозначных функций с фиксированной мажорантой модулей непрерывности старших производных в работе рассматривается задача восстановления функций из этого класса по значениям на них заданного числа линейных векторных функционалов путем комбинирования этих значений с помощью скалярных функций. Установлена слабая асимптотика поведения в зависимости от числа функционалов величины наилучшей точности восстановления в этой задаче. Настоящая статья продолжает исследования, проводившиеся автором в отношении классов вещественнозначных функций конечной гладкости, распространяя их на классы векторнозначных функций. Рассмотренный в работе способ восстановления векторнозначных функций является развитием понятия линейного n -поперечника применительно к ситуации, в которой осуществляется приближение векторнозначных функций. Полученные результаты могут быть использованы для построения алгоритмов, восстанавливающих многомерные объекты.

Ключевые слова: векторнозначные функции, конечная гладкость, восстановление функций, линейные функционалы.

Abstract. For a class of vector-valued functions with a fixed majorant of moduli of continuity of highest derivatives, the problem of restoring functions from this class from the values on them of a given number of linear vector functionals by combining these values using scalar functions is considered. A weak asymptotic behavior is established depending on the number of functionals of the value of the best restoration accuracy in this problem. This article continues the research carried out by the author regarding classes of real-valued functions of finite smoothness, extending them to classes of vector-valued functions. The method for reconstructing vector-valued functions considered in this work is a development of the concept of a linear n -difference in relation to a situation in which approximation of vector-valued functions is carried out. The results can be used to build algorithms that restore multidimensional objects.

Keywords: vector-valued functions, finite smoothness, restoration of functions, linear functionals.

Введение

Задачи восстановления функций стандартных классов в различных постановках занимают значительное место в теории приближений вещественнозначных функций. Наиболее близкой из них к теме настоящей статьи является задача описания асимптотики линейных n -поперечников классов вещественных функций конечной гладкости в пространствах с интегральной нормой. Ознакомиться с результатами, относящимися к этой проблематике, можно, обратившись к работам [1–4].

Изучение функций, принимающих значения в банаховых пространствах, например, случайных процессов, естественно, приводит к рассмотрению функциональных классов и постановке задач, аналогичных тем, которые имеются в теории вещественнозначных функций, возникает необходимость распространения существующих результатов, касающихся вещественнозначных функций, на случай векторнозначных функций.

Объектом изучения в настоящей работе является класс $F_p^{l,\omega}(I^d, X)$ функций, определенных на единичном кубе I^d , принимающих значения в сепарабельном рефлексивном банаховом пространстве X , обобщенные частные производные до порядка l которых принадлежат $L_p(I^d, X)$,

а модули непрерывности в $L_p(I^d, X)$ производных порядка l в совокупности не превосходят заданного модуля непрерывности ω . Вводится величина наилучшей точности восстановления в пространстве $L_q(I^d, X)$ функций из класса $F_p^{l,\omega}(I^d, X)$ по значениям на них n линейных векторных функционалов путем комбинирования этих значений с помощью скалярных функций. Последняя величина в каком-то смысле обобщает понятие линейного n -поперечника множеств в функциональных пространствах. Для указанной величины установлена слабая асимптотика поведения в зависимости от n .

Для вывода верхней оценки величины наилучшей точности восстановления по значениям n линейных функционалов использована схема, применявшаяся в работах [3] и [4] для оценки сверху линейного n -поперечника рассматриваемых там классов функций. Однако при $p < 2 < q$ эту схему удалось реализовать лишь в случае гильбертова пространства X , а не рефлексивного банахова пространства, как при других значениях p, q . Оценка снизу величины наилучшей точности восстановления по значениям n линейных функционалов для $F_p^{l,\omega}(I^d, X)$ сводится к нижней оценке линейного n -поперечника класса $F_p^{l,\omega}(I^d, \mathbb{R})$, которая взята из работы [4].

Предварительные сведения

Определим рассматриваемые ниже объекты и отметим некоторые их свойства (подробнее см. [5]).

Для банахова пространства X над \mathbb{R} , как обычно, через X^* будет обозначаться банахово пространство непрерывных линейных функционалов $x^* : X \mapsto \mathbb{R}$, с нормой

$$\|x^*\|_{X^*} = \sup_{x \in B(X)} |\langle x^*, x \rangle|,$$

где $B(X) = \{x \in X : \|x\|_X \leq 1\}$.

Для банаховых пространств X, Y через $\mathcal{B}(X, Y)$ обозначим банахово пространство непрерывных линейных операторов $A : X \mapsto Y$ с нормой

$$\|A\|_{\mathcal{B}(X, Y)} = \sup_{x \in B(X)} \|Ax\|_Y.$$

Пусть $d \in \mathbb{N}, D$ – измеримое по Лебегу множество в \mathbb{R}^d и X – сепарабельное банахово пространство (над \mathbb{R}). Тогда функция $f : D \mapsto X$ будет называться измеримой (по Лебегу) на множестве D , если для любого $x^* \in X^*$ функция $\langle x^*, f(\cdot) \rangle$ является измеримой (по Лебегу) на D .

Ясно, что измеримые на множестве D функции со значениями в пространстве X образуют линейное пространство по операциям поточечного сложения и умножения на скаляры.

Рассмотрим доказательство леммы из работы [5].

Лемма 1. Пусть $d \in \mathbb{N}, D$ – измеримое по Лебегу множество в \mathbb{R}^d, X – сепарабельное банахово пространство и $f : D \mapsto X$ – функция на D . Тогда имеют место следующие утверждения:

1) если для любого $x^* \in X^*$ почти для всех $t \in D$ значение $\langle x^*, f(t) \rangle = 0$, то $f(t) = 0$ почти для всех $t \in D$;

2) если f – измеримая функция на D , то $\|f(\cdot)\|_X$ также является измеримой функцией на D .

Пусть множество D и пространство X удовлетворяют условиям леммы 1. Тогда определенные на множестве D функции f и g со значениями в пространстве X будем называть эквивалентными, если почти для всех $t \in D$ имеет место равенство $f(t) = g(t)$.

Понятно, что в условиях леммы 1 функции f и g эквивалентны тогда и только тогда, когда для любого $x^* \in X^*$ эквивалентны функции $\langle x^*, f(\cdot) \rangle$ и $\langle x^*, g(\cdot) \rangle$.

Будем говорить, что измеримая в области $D \subset \mathbb{R}^d$ функция $f : D \mapsto X$ слабо локально суммируема в D , если для любого $x^* \in X^*$ для любого компакта $G \subset D$ функция $\langle x^*, f(\cdot) \rangle$ суммируема на G .

Для $d \in \mathbb{N}$ обозначим через

$$\mathbb{Z}_+^d = \{\lambda \in \mathbb{Z}^d : \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, d\},$$

при $l \in \mathbb{Z}_+, d \in \mathbb{N}$ через \mathbb{Z}_{+l}^d обозначим множество

$$\{\lambda \in \mathbb{Z}_+^d : |\lambda| \leq l\}, \quad \text{где } |\lambda| = \sum_{j=1}^d \lambda_j,$$

а через \mathbb{Z}_{+l}^d – множество

$$\{\lambda \in \mathbb{Z}_+^d : |\lambda| = l\}.$$

При $d \in \mathbb{N}$ для области $D \subset \mathbb{R}^d$ через $C_0^\infty(D)$, как обычно, обозначается пространство всех бесконечно дифференцируемых функций $\varphi: \mathbb{R}^d \mapsto \mathbb{R}$, для каждой из которых ее носитель $\text{supp } \varphi \subset D$.

Пусть $d \in \mathbb{N}, \lambda \in \mathbb{Z}_+^d, D$ – область в \mathbb{R}^d, X – сепарабельное банахово пространство и $f: D \mapsto X$ – слабо локально суммируемая в D функция. Тогда будем говорить, что слабо локально суммируемая в D функция $g: D \mapsto X$ является обобщенной частной производной порядка λ функции f , и обозначать $g = D^\lambda f = \frac{D^{|\lambda|} f}{Dt_1^{\lambda_1} \dots Dt_d^{\lambda_d}}$, если для любых $x^* \in X^*$ и $\varphi \in C_0^\infty(D)$

выполняется равенство

$$\int_D \varphi(t) \langle x^*, g(t) \rangle dt = (-1)^{|\lambda|} \int_D D^\lambda \varphi(t) \langle x^*, f(t) \rangle dt.$$

Определение обобщенной производной $D^\lambda f$ – корректно с учетом отождествления эквивалентных функций (см. п. 1 леммы 1).

Для множества D , пространства X , удовлетворяющих условиям леммы 1, и $p: 1 \leq p \leq \infty$, обозначим через $L_p(D, X)$ линейное пространство, состоящее из (отождествляемых между собой эквивалентных) измеримых функций $f: D \mapsto X$, для которых определена норма

$$\|f\|_{L_p(D, X)} = \begin{cases} \left(\int_D \|f(t)\|_X^p dt \right)^{1/p}, & \text{при } p < \infty, \\ \sup \text{vrai}_{t \in D} \|f(t)\|_X, & \text{при } p = \infty. \end{cases}$$

Посредством таких же рассуждений, как и в случае вещественных функций, устанавливается теорема.

Теорема 1. При тех условиях на D, X и p , которые указаны в определении, $L_p(D, X)$ является полным нормированным пространством.

Пусть $l \in \mathbb{Z}_+, d \in \mathbb{N}, 1 \leq p \leq \infty, D$ – область в \mathbb{R}^d и X – сепарабельное банахово пространство. Тогда обозначим через $W_p^l(D, X)$ линейное пространство всех функций $f \in L_p(D, X)$, для каждой из которых при $\lambda \in \mathbb{Z}_{+l}^d$ в $L_p(D, X)$ существует обобщенная частная производная $D^\lambda f$, с нормой, определяемой равенством

$$\|f\|_{W_p^l(D, X)} = \sum_{j=0}^l \|f\|_{L_p^j(D, X)},$$

где

$$\|f\|_{L_p^j(D, X)} = \sum_{\lambda \in \mathbb{Z}_{+j}^d} \|D^\lambda f\|_{L_p(D, X)}.$$

Теорема 2. Для l, d, p, D, X , удовлетворяющих условиям, приведенным в определении, $W_p^l(D, X)$ является полным нормированным пространством.

Для $d \in \mathbb{N}$ в \mathbb{R}^d фиксируем норму

$$\|t\| = \max_{\{j=1, \dots, d\}} |t_j|, t \in \mathbb{R}^d.$$

Пусть $l \in \mathbb{Z}_+$, $d \in \mathbb{N}$, $1 \leq p \leq \infty$, D – область в \mathbb{R}^d , X – сепарабельное банахово пространство и ω – произвольный модуль непрерывности, т.е. $\omega: [0, \infty) \mapsto \mathbb{R}$ – непрерывная функция, обладающая следующими свойствами:

$$0 = \omega(0) \leq \omega(\delta) \leq \omega(\delta + \sigma) \leq \omega(\delta) + \omega(\sigma), \delta, \sigma \in [0, \infty).$$

Обозначим через $F_p^{l, \omega}(D, X)$ множество всех функций $f \in W_p^l(D, X)$, для каждой из которых выполняется неравенство

$$\sum_{\lambda \in \mathbb{Z}_+^d} \sup_{h \in \mathbb{R}^d} \text{vrai}_{h \in \mathbb{R}^d} (1/\omega(\|h\|)) \|D^\lambda f(t+h) - D^\lambda f(t)\|_{L_p(D_h, X)} \leq 1,$$

где $D_h = \{t \in D : t + uh \in D \forall u \in [0, 1]\}$.

При $d \in \mathbb{N}$ положим $I^d = \{t \in \mathbb{R}^d : 0 < t_j < 1, j = 1, \dots, d\}$. Имеет место следующее утверждение.

Теорема 3. Пусть X – сепарабельное рефлексивное банахово пространство над \mathbb{R} . Пусть еще $l \in \mathbb{Z}_+$, $d \in \mathbb{N}$, $1 \leq q \leq p \leq \infty$ и ω – произвольный модуль непрерывности или $l \in \mathbb{Z}_+$, $d \in \mathbb{N}$, $1 \leq p < q \leq \infty$ и модуль непрерывности ω таковы, что существует константа $c_0(l, d, p, q, \omega) > 0$ такая, что для $\delta \in [0, 1]$ выполняется неравенство

$$\int_0^1 t^{l-d/p+d/q-1} \omega(\delta t) dt \leq c_0 \omega(\delta).$$

Тогда справедливо соотношение

$$F_p^{l, \omega}(I^d, X) \subset L_q(I^d, X).$$

Основной результат

Теперь опишем точную постановку задачи и приведем полученный результат.

Сначала введем обозначения.

Как и выше, для банаховых пространств X, Y через $\mathcal{B}(Y, X)$ будем обозначать пространство непрерывных линейных операторов, действующих из Y в X , а через $\mathcal{B}^n(Y, X)$, $n \in \mathbb{N}$, – произведение n экземпляров пространства $\mathcal{B}(Y, X)$.

Для множества D и банахова пространства X через $S(D, X)$ обозначим некоторое банахово пространство функций, определенных на множестве D , принимающих значения в X .

Через $\mathcal{H}(S(D, X))$ обозначим пространство всех функций $\varphi: D \mapsto \mathbb{R}$, для которых при любом $x \in X$ функция $\varphi(\cdot) \cdot x$ принадлежит $S(D, X)$, а через $\mathcal{H}^n(S(D, X))$ обозначим произведение n экземпляров пространства $\mathcal{H}(S(D, X))$.

Для множества $K \subset S(D, X)$ при $n \in \mathbb{N}$ положим

$$\lambda_n(K, S(D, X)) = \inf_{\varphi \in \mathcal{H}^n(S(D, X)), \xi \in \mathcal{B}^n(S(D, X), X)} \sup_{f \in K} \left\| f(\cdot) - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\cdot) \xi_i(f) \right\|_{S(D, X)}.$$

Установлена такая теорема.

Теорема 4. Пусть $l \in \mathbb{Z}_+$, $d \in \mathbb{N}$, X – сепарабельное рефлексивное банахово пространство, $1 \leq p, q \leq \infty$, ω – модуль непрерывности и $D = I^d$, $S(D, X) = L_q(I^d, X)$, $K = F_p^{l, \omega}(I^d, X)$ (см. теорему 3).

Тогда

$$\lambda_n(K, S(D, X)) \asymp \begin{cases} n^{-l/d+(1/p-1/q)_+} \omega(n^{-1/d}), & \text{при } q \leq p \text{ или } ((p < q \leq 2 \text{ или } 2 \leq p < q) \\ & \text{и соблюдении условия (1)),} \\ n^{-l/d+1/2-1/\tilde{u}+(1/p+1/q-1)_+} \omega(n^{-1/d}), & \text{при } p < q < 2, l-d-(d/p-d/q) > 0 \\ & \text{для сепарабельного гильбертового} \\ & \text{пространства } X, \end{cases}$$

где $t_+ = (t + |t|) / 2, t \in \mathbb{R}$.

Заключение

Полученные результаты, позволяют оценивать порядок точности восстановления векторнозначных функций из рассматриваемых классов по заданному числу значений на них линейных функционалов при восстановлении описанным выше способом.

Библиографический список

1. Майоров, В. Е. О линейных поперечниках соболевских классов / В. Е. Майоров // ДАН СССР. – 1978. – Т. 243, № 5. – С. 1127–1130.
2. Höllig, K. Approximationszahlen von Sobolev-Einbettungen / K. Höllig // Math. Ann. – 1979. – Vol. 242. – P. 273–281.
3. Höllig, K. Diameters of classes of smooth functions / K. Höllig // Quantitative approximation. – New York : Springer, 1980. – P. 163–176.
4. Кудрявцев, С. Н. Поперечники классов гладких функций / С. Н. Кудрявцев // Известия РАН. Математика. – 1995. – Т. 59, № 4. – С. 81–104.
5. Кудрявцев, С. Н. Восстановление векторнозначных функций конечной гладкости по их значениям в заданном числе точек / С. Н. Кудрявцев // Теоретические и прикладные задачи нелинейного анализа. – Москва : ВЦ РАН, 2010. – С. 3–33.

References

1. Mayorov V. E. *DAN SSSR*. 1978, vol. 243, no. 5, pp. 1127–1130. [In Russian]
2. Höllig K. *Math. Ann.* 1979, vol. 242, pp. 273–281.
3. Höllig K. *Quantitative approximation*. New York: Springer, 1980, pp. 163–176.
4. Kudryavtsev S. N. *Izvestiya RAN. Matematika* [Izvestiya RAS. Mathematics]. 1995, vol. 59, no. 4, pp. 81–104. [In Russian]
5. Kudryavtsev S. N. *Teoreticheskie i prikladnye zadachi nelineynogo analiza* [Theoretical and applied problems of nonlinear analysis]. Moscow: VTs RAN, 2010, pp. 3–33. [In Russian]

Кудрявцев Сергей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
отдел управления робототехническими
устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: kudrsn@yandex.ru

Kudryavtsev Sergey Nikolaevich

candidate of physical and mathematical sciences,
senior researcher,
department of control of robotic devices,
Federal Research Center «Computer science
and control» of the Russian Academy of Sciences
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Кудрявцев, С. Н. Восстановление векторнозначных функций по значениям на них линейных функционалов / С. Н. Кудрявцев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 32–36. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-5.

А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько

К ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

A. I. Diveev, E. Yu. Shmalko

TO THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF SOLVING THE OPTIMAL CONTROL PROBLEM

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повсеместная роботизация и современная высокопроизводительная технология изготовления роботов требуют от разработчиков систем автоматического управления таких же высокопроизводительных методов создания систем управления этими роботами. Обычная процедура построения систем управления включает разработку математической модели объекта управления, робота, формализацию задачи управления, разработку нового или применение одного из существующих методов для решения формальной математической задачи и реализацию полученного решения на бортовом процессоре объекта управления, робота. Одной из наиболее известных задач управления является задача оптимального управления, сформулированная Л. С. Понтрягиным [1]. В самой книге неоднократно указывается на техническую направленность полученных результатов, в частности в аннотации к монографии сказано: «Этот принцип (имеется в виду принцип максимума Понтрягина) позволят решать ряд задач математического и прикладного характера...», далее там же: «Книга представляет интерес... и как руководство, которым могут пользоваться инженер и конструктор». Как показали дальнейшие исследования, что даже реализация численного метода решения краевой задачи, к которой приводит принцип максимума Понтрягина, представляет собой существенную проблему [2]. Но если эту проблему с помощью современных вычислителей еще как-то сегодня решают, то вопрос о том, что дальше делать с полученным решением и как его реализовывать в реальном объекте управления, остается открытым. Считается, что для реализации решения, необходимо построить дополнительную систему стабилизации, но единого мнения и метода, как это сделать, не существует. Настоящая работа посвящена исследованию методов реализации решения задачи оптимального управления. В связи с ужесточением требований к времени создания систем управления робототехническими устройствами эта проблема становится чрезвычайно актуальной. *Материалы и методы.* В работе приводятся исследования различных методов синтеза систем стабилизации движения объекта управления

Abstract. *Background.* Ubiquitous robotics and modern high-performance robot manufacturing technology require developers of automatic control systems to use high-performance methods for creating control systems for these robots. The usual procedure for constructing control systems includes developing a mathematical model of a control object, a robot, formalizing a control problem, applying one of the existing methods or developing a new one to solve a formal mathematical problem and implementing the resulting solution on an on-board processor of a control object, a robot. One of the most well-known control problems is the optimal control problem formulated by L.S. Pontryagin. The book itself repeatedly indicates the technical orientation of the results obtained, in particular, in the annotation to the monograph it is said “This principle (meaning the Pontryagin’s maximum principle) will allow solving a number of mathematical and applied problems ...”, then in the same place “The book is ... a manual that can be used by an engineer and designer. ”. As further studies have shown, even the numerical solution of the boundary value problem, which the Pontryagin’s maxim principle leads to, is a rather difficult problem. But, if this problem is somehow solved today using modern computers, the question of what to do next with the resulting solution and how to implement it in a real control object remains open. It is believed that to implement the solution, it is necessary to build an additional stabilization system, but there is no consensus on how to do this. The present work is devoted to the study of methods for implementing the solution of the optimal control problem. In connection with the tightening of the time requirements for the creation of control systems for robotic devices, this task becomes extremely urgent. *Materials and methods.* The paper presents studies of various methods for the control system synthesis for stabilizing the movement of a control object along a given path. Both classical technical and analytical approaches, as well as modern computational methods based on the use of evolutionary algorithms are considered. As one of the alternatives, it is proposed to reformulate the optimal control problem with the inclusion of the stabilization system synthesis problem in its formulation. *Results.* Various approaches to the implementation of the

по заданной траектории. Рассматриваются как классические технические и аналитические подходы, так и современные вычислительные методы, основанные на применении эволюционных алгоритмов. В качестве одной из альтернатив предложено переформулировать задачу оптимального управления с включением в ее постановку задачу синтеза системы стабилизации. *Результаты.* Приведены различные подходы к реализации решения задачи оптимального управления в системе управления реальным объектом. Продемонстрированы проблемы, достоинства и недостатки рассмотренных методов синтеза систем стабилизации движением объекта управления по заданной траектории. Сформулирована задача оптимального управления, включающая этап синтеза системы стабилизации движения по оптимальной траектории. *Выводы.* Рассмотрены и исследованы с точки зрения прикладной реализации различные методы синтеза системы стабилизации достижения объекта управления по заданной траектории. Результаты исследования показывают, что либо разработанные известными методами системы стабилизации не обеспечивают точного движения объекта управления по заданной траектории с сохранением значения критерия качества, либо постановка задачи синтеза управления оказывается существенно сложнее задачи оптимального управления и ее решение требует разработки новых вычислительных методов. Все системы стабилизации изменяют математическую модель объекта управления, которая рассматривалась при решении задачи оптимального управления, поэтому с точки зрения исходного критерия качества движение по заданной траектории реального объекта не является оптимальным.

Ключевые слова: беспилотное транспортное средство, модель прогностического управления, нейронная сеть, метод оптимизации роя частиц.

solution of the optimal control problem in the control system of a real object are presented. Advantages and disadvantages of the considered methods for stabilization systems synthesis for the motion of a control object along a given path are demonstrated. The optimal control problem is formulated, which includes the stage of synthesis of a stabilization system for movement along an optimal trajectory. *Conclusions.* From the point of view of applied implementation, various methods of the system synthesis for stabilizing a control object along a given path to achieve the goal are considered and investigated. The results of the study show that either the stabilization systems developed by well-known methods do not provide the exact movement of the control object along a given trajectory while maintaining the value of the quality criterion, or the formulation of the control synthesis problem is much more complicated than the optimal control problem and its solution requires the development of new computational methods. All stabilization systems change the mathematical model of the control object, which was considered when solving the optimal control problem, therefore, from the point of view of the initial quality criterion, movement along a given trajectory of a real object is not optimal.

Keywords: unmanned vehicle, predictive control model, neural network, particle swarm optimization method.

Введение

Решение задачи оптимального управления в постановке Л. С. Понтрягина [1] приводит к нахождению функции управления, аргументом которой является время. Очевидно, что такое управление является разомкнутым и не может быть поставлено непосредственно в систему управления реальным объектом, так как любое несовпадение по времени движения объекта и управления приведет к тому, что цель управления не будет достигнута и значение критерия качества будет отличаться от полученного при решении математической задачи. Для реализации полученного решения требуется разработка системы управления с функцией обратной связи. Решение задачи оптимального управления на основе решения уравнения Р. Беллмана [3] приводит к нахождению управления в виде функции от координат пространства состояний. Однако решение в численном виде этого уравнения с помощью метода динамического программирования, предложенного также Р. Беллманом [4], как правило, возможно только для одного начального значения. Поэтому оно ничем не лучше с точки зрения практической реализации, чем решение, полученное для задачи в постановке Л. С. Понтрягина. Любое отклонение реального объекта от значений координат вектора состояния, полученных при решении методом динамического программирования, приведет также к непопаданию в цель и к изменению значения критерия качества. Для реализации этих решений необходимо создание систем управления, стабилизирующих движение объекта управления относительно найденных решений.

При разработке системы стабилизации движения возникают различные проблемы и подходы к их преодолению при реализации системы стабилизации. Например, одна из проблем состоит

в том, что если стабилизировать программную траекторию во времени, точное движение по оптимальной пространственной траектории не будет оптимальным движением, если оно не совпадает с ним по времени. Цель настоящей работы состоит в рассмотрении различных методов прикладной реализации решения задачи оптимального управления.

Задача оптимального управления

В математической постановке задачи оптимального управления задана математическая модель объекта управления в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор состояния объекта управления, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, \mathbf{u} – вектор управления, $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m$, U – компактное множество, $m \leq n$.

Для системы (1) заданы начальные и терминальные условия

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0, \quad (2)$$

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f, \quad (3)$$

где t_f – терминальное время окончания процесса управления, которое не задано, но ограничено и определяется по достижению терминального состояния (3)

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t)\| < \varepsilon, \\ t^+ & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где t^+ – заданное предельное время процесса управления, ε – заданная точность попадания в терминальное состояние.

Задан критерий качества управления в виде интегрального функционала

$$J = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \rightarrow \min_{\bar{\mathbf{u}}(\cdot) \in U}, \quad (5)$$

где $\bar{\mathbf{u}}$ – любое допустимое управление, которое для любого момента времени принадлежит компактному множеству U и при котором решение системы (1) из начального состояния (2) достигает терминального состояния (3).

Решением задачи оптимального управления в данной постановке является векторная функция времени

$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{v}(t), \quad (6)$$

значение которой в любой момент времени процесса управления принадлежит заданному компактному множеству

$$\mathbf{v}(t) \in U, \quad \forall t \in [0; t_f]. \quad (7)$$

Оптимальное решение $\tilde{\mathbf{x}}(t, \mathbf{x}^0)$ системы дифференциальных уравнений с оптимальной функцией управления

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v}(t)) \quad (8)$$

из начального состояния (2) достигает в момент t_f терминального состояния (3),

$$\|\mathbf{x}(t_f, \mathbf{x}^0) - \mathbf{x}^f\| < \varepsilon, \quad (9)$$

с минимальным значением критерия качества (5)

$$\int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0), \mathbf{v}(t)) dt = \min \left\{ \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt, \forall \bar{\mathbf{u}}(\cdot) \in U \right\}. \quad (10)$$

Данное оптимальное решение $\bar{\mathbf{x}}(t, \mathbf{x}^0)$ не обладает никакими специальными свойствами. В идеале для реализации данного решения необходимо было бы, чтобы оно было устойчивым по Ляпунову [5]. Для обеспечения этого свойства в системе (8) нет необходимых ресурсов, так как свободный вектор управления задействован под решение задачи оптимального управления (1)–(8). Для неустойчивого решения дифференциального уравнения любое возмущение в любой момент времени $\tilde{\mathbf{x}}(t_1, \mathbf{x}^0) + \Delta \mathbf{x}$ может привести к сколь угодно большим отклонениям, поэтому для реализации решения необходимо рассмотреть другие задачи.

Задача синтеза системы стабилизации оптимальной траектории

После решения задачи оптимального управления (1) – (8) рассмотрим задачу синтеза системы стабилизации в окрестности полученной оптимальной траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t, \mathbf{x}^0)$. В данной задаче рассматривается следующая модель объекта управления

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, D(\tilde{\mathbf{x}}(t, \mathbf{x}^0) - \mathbf{x}(t), \mathbf{q})), \tag{11}$$

где $D(\mathbf{y}, \mathbf{q})$ – операторное уравнение системы стабилизации, \mathbf{q} – вектор постоянных параметров $\mathbf{q} = [q_1 \dots q_p]^T$, в частности, если оператор статический, то он является векторной функцией своих аргументов

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\tilde{\mathbf{x}}(t, \mathbf{x}^0) - \mathbf{x}(t), \mathbf{q})). \tag{12}$$

Для определения значений параметров используем критерий

$$\int_0^{t_f} \|\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0) - \mathbf{x}(t)\| dt \rightarrow \min_{\mathbf{q}}. \tag{13}$$

В качестве нормы в формуле (13) может быть использована любая выпуклая норма между векторными функциями.

Заметим, что дифференциальное уравнение (12) существенно отличается от исходного уравнения (1) или (8). Напомним, что система (12) описывает динамику движения реального объекта управления с системой стабилизации. Тогда возникает вопрос, оптимальное управление какого объекта мы хотим получить. Уравнение (1) описывает динамику абстрактного объекта до включения в него контура системы стабилизации. Тем не менее, если решить задачу (11)–(13), получим систему дифференциальных уравнений, частное решение которой из начального состояния (2) будет в процессе управления находиться в окрестности оптимальной траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t, \mathbf{x}^0)$ и скорее всего достигнет терминального состояния (3), возможно, в другое время, чем t_f . Здесь следует отметить интересный пример, приведенный в монографии [6], где показано, что любое приближение двух функций по любой норме не гарантирует близости значений функционала качества, вычисленных для этих функций.

Другой проблемой при построении системы стабилизации является то, что она в некоторых случаях не может быть построена принципиально, из-за отсутствия избыточных ресурсов управления по отношению к исходной задаче (1)–(8). Например, если задача оптимального управления решалась по критерию быстродействия, то оптимальное управление, как правило, для такой задачи находится на границе компактного множества U , поэтому в случае отклонения решения от оптимальной траектории по времени приближение невозможно реализовать никакой системой стабилизации.

Другой путь реализации оптимального управления состоит в дискретизации функции оптимального управления по времени. Введем интервал времени Δt и отметим на оси времени значения оптимальной траектории, получим множество точек в пространстве состояний

$$\tilde{X} = \{\mathbf{x}(0, \mathbf{x}^0), \mathbf{x}(\Delta t, \mathbf{x}^0), \mathbf{x}(2\Delta t, \mathbf{x}^0), \dots, \mathbf{x}(K\Delta t, \mathbf{x}^0)\}, \tag{14}$$

где K – количество точек оптимальной траектории.

Здесь можно решить задачу общего синтеза [7], т.е. для системы (1) найти функцию обратной связи

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (15)$$

чтобы система дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})) \quad (16)$$

имела устойчивую точку равновесия $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^n$. Затем, подставляя вместо точек равновесия точки оптимальной траектории из множества (14) через заданный интервал времени, обеспечить движение объекта в окрестности оптимальной траектории. Данный подход наиболее конструктивен, по сравнению с вышеперечисленными. Он имеет еще преимущество в том, что замкнутый объект управления всегда устойчив относительно некоторой точки в пространстве состояний, поэтому он обладает свойствами робастности и его поведение не сильно изменяется при малых возмущениях начального состояния или самой математической модели.

Проблема решения задачи общего синтеза для обеспечения устойчивости объекта управления или системы дифференциальных уравнений, описывающих модель объекта управления, не такая простая задача. Сегодня наиболее популярными методами ее решения являются методы обратного обхода интегратора (backstepping) [8] и метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов [9].

Следует отметить, что множество значений оптимальной траектории в пространстве состояний вместе с множеством значений оптимального управления в эти же моменты времени получается при решении задачи оптимального управления в постановке Р. Беллмана при численном решении уравнения Беллмана методом динамического программирования.

Данный подход имеет следующие недостатки. Во-первых, задача общего синтеза является достаточно сложной. В задаче необходимо найти векторную функцию обратной связи (15), такую, чтобы система уравнений (16) имела устойчивую точку равновесия $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^n$, т.е. чтобы матрица линеаризованной системы (16) в точке равновесия имела все собственные значения в левой полуплоскости комплексной плоскости

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{h}(0)) = 0, \quad (17)$$

$$\det \left(\lambda \mathbf{E} - \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}} \right) = \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdot \dots \cdot (\lambda - \lambda_n) = 0, \quad (18)$$

где $\lambda_j = \alpha_j + i\beta_j$, $\alpha_j < 0$, $j = 1, \dots, n$, $i = \sqrt{-1}$.

Следовательно, любое частное решение системы (16) из некоторой области начальных условий $X_0 \subseteq \mathbb{R}^n$ стремится в устойчивую точку равновесия $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^n$.

Во-вторых, не все точки оптимальной траектории могут быть точками устойчивого равновесия, например, система дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = h(x_1, x_2)$$

при любой функции $h(x_1, x_2)$ имеет точки равновесия только на оси $x_1, x_2 = 0$.

В-третьих, траектория движения между точками равновесия может существенно отличаться от оптимальной.

Задача оптимального синтезированного управления

Если все же при реализации решения задачи оптимального управления нельзя обойтись без решения задачи синтеза системы управления, то почему бы не объединить эти две задачи в одну.

Пусть задана математическая модель объекта управления (1). Заданы начальное (2) и терминальное (3) состояния. Задан критерий качества (5). Задана ограниченная область пространства состояний, в которую входят начальное и терминальное состояния

$$\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f \in X \subseteq \mathbb{R}^n. \quad (19)$$

Задан дополнительный критерий качества для синтеза системы управления. Допустим, этот критерий состоит в комбинации времени и точности достижения точки равновесия:

$$J_1 = t_{\max} + s\delta_{\max}, \tag{20}$$

где t_{\max} – максимальное время достижения устойчивой точки равновесия из рассматриваемой области (19); δ_{\max} – наихудшая точность достижения устойчивой точки равновесия из области (19); s – весовой коэффициент.

Задан интервал времени переключения

$$\Delta t < t^+. \tag{21}$$

Необходимо, во-первых, решить задачу общего синтеза для области (19) и найти управление в виде функции обратной связи

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}), \tag{22}$$

где \mathbf{x}^* – ограниченный вектор постоянных параметров, имеющий размерность n . Он может не описывать координаты устойчивой точки равновесия $\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*)$ в пространстве состояний, но оказывает влияние на ее положение

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(\mathbf{x}^*), \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*))) = 0. \tag{23}$$

Точку \mathbf{x}^* называем определяющей.

При поиске функции управления (22) используем критерий качества (20), причем значения времени попадания в точку равновесия и точность определяем для ограниченной области в уравнении (19).

На втором этапе находим координаты определяющих точек

$$\mathbf{x}^{*,1}, \dots, \mathbf{x}^{*,K}, \tag{24}$$

где K – количество определяющих точек

$$K = \lceil t^+ / \Delta t \rceil. \tag{25}$$

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим пример решения задачи оптимального синтезированного управления для управления мобильным роботом.

Математическая модель объекта управления имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0,5(u_1 + u_2) \cos(x_3), \\ \dot{x}_2 &= 0,5(u_1 + u_2) \sin(x_3), \\ \dot{x}_3 &= 0,5(u_1 - u_2). \end{aligned} \tag{26}$$

На управление робота наложено ограничение

$$-10 \leq u_i \leq 10, \quad i = 1, 2. \tag{27}$$

Задано начальное положение робота

$$x_1(0) = 10, \quad x_2(0) = 10, \quad x_3(0) = 0. \tag{28}$$

Задано терминальное состояние робота

$$x_1^f = 0, \quad x_2^f = 0, \quad x_3^f = 0. \tag{29}$$

Задан критерий качества управления, включающий штраф за фазовые ограничения:

$$J = t_f + \sum_{j=1}^4 \int_0^{t_f} \vartheta(r_j - \sqrt{(x_{1,j} - x_1(t))^2 + (x_{2,j} - x_2(t))^2}) dt, \tag{30}$$

где t_f определяется по формуле (4), в которой $t^+ = 2,5$ с, $\varepsilon = 0,01$, $r_1 = 3$, $r_2 = 1,5$, $r_3 = 3$, $r_4 = 1,5$, $x_{1,1} = 2,5$, $x_{2,1} = 2,5$, $x_{1,2} = 2$, $x_{2,2} = 8$, $x_{1,3} = 7,5$, $x_{2,3} = 7,5$, $x_{1,4} = 8$, $x_{2,4} = 2$, $\vartheta(A)$ – функция Хэвисайда

$$\vartheta(A) = \begin{cases} 1, & \text{если } A > 0, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (31)$$

Для задачи синтеза управления определяем область пространства состояний, включающую начальное и терминальное состояния

$$X = \{-2 \leq x_1 \leq 10, -2 \leq x_2 \leq 10, -0,5\pi \leq x_1 \leq 0,5\pi\}. \quad (32)$$

Для области (32) для терминальной точки (29) решаем задачу общего синтеза методом Декартового генетического программирования [10]. В результате получаем следующую функцию управления:

$$u_1 = B + C + \text{sgn}(B)\exp(|B| - 1), \quad (33)$$

$$u_2 = C - B - \text{sgn}(B)\exp(|B| - 1), \quad (34)$$

где

$$B = q_1(x_1^* - x_1) + \text{sgn}((x_1^* - x_1)(x_2^* - x_2))\sqrt{|(x_1^* - x_1)(x_2^* - x_2)|},$$

$$C = 2(x_1^* - x_1) + \text{sgn}(x_1^* - x_1)q_2,$$

$$q_1 = 3,1094, \quad q_2 = 3,6289.$$

Из заданного интервала (21) $\Delta t = 0,7$ и предельного времени $t^+ = 2,5$ вычисляем по формуле (25) количество определяющих точек $K = 3$.

По критерию (30) находим оптимальные положения определяющих точек эволюционным алгоритмом роя частиц [9]:

$$\mathbf{x}^{*,1} = [-1,8344 \quad 1,6675 \quad -0,4539]^T, \quad \mathbf{x}^{*,2} = [5,5795 \quad -1,0247 \quad -0,8759]^T,$$

$$\mathbf{x}^{*,3} = [-0,02161 \quad 0,2841 \quad -0,01236]^T.$$

Графики оптимальных траекторий на плоскости $\{x_1, x_2\}$ приведены на рис. 1.

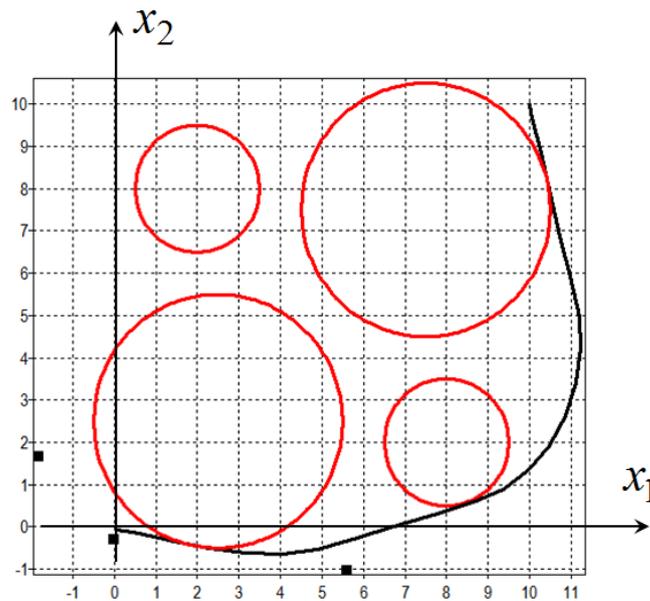


Рис. 1. Траектория оптимального синтезированного управления

На рис. 1 кругами обозначены фазовые ограничения, черными маленькими квадратами – определяющие точки, траектория движения задана черной линией. Как видим из графика, несмотря на сложные фазовые ограничения, эволюционному алгоритму удалось найти такие положения определяющих точек, что траектория движения достигла терминального состояния, не задев фазовые ограничения. Значение функционала (30) $J = 2,6313$.

Для сравнения была решена задача оптимального управления (26) – (31) прямым методом, в котором управления искались как кусочно-линейные функции времени на 10 интервалах для $\Delta t = 0,25$ с. Для поиска решения использовался также эволюционный алгоритм роя частиц [11]. Графики оптимальных траекторий приведены на рис. 2. Как видим из рисунка, оптимальная траектория имеет более резкие повороты, чем при синтезированном оптимальном управлении, и также проходит вблизи фазовых ограничений. Значение функционала для оптимального решения $J = 2,5113$.

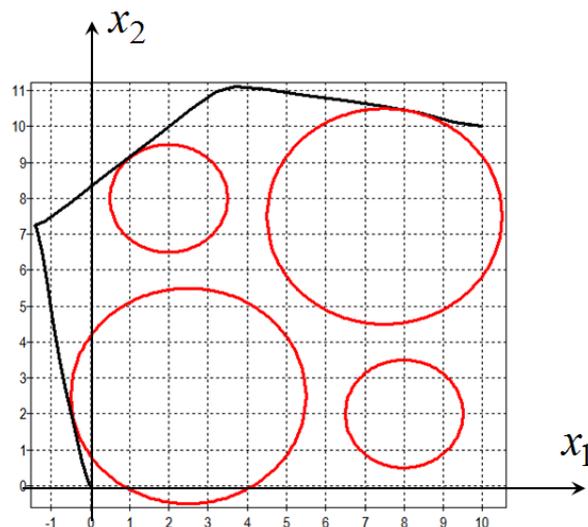


Рис. 2. Траектория оптимального управления

Задача синтезированного оптимального управления ранее рассматривалась [12] как один из методов решения задачи оптимального управления с целью упрощения этой задачи для групп объектов, где имеется большое количество фазовых ограничений, в том числе и динамических.

Заключение

Рассмотрены методы реализации решения задачи оптимального управления. Показано, что для реализации решения необходимо сконструировать систему стабилизации. Формально для построения оптимальной системы стабилизации необходимо решить задачу общего синтеза управления, которая является более сложной, чем исходная задача оптимального управления. Предложено объединить две задачи в одну и назвать ее задачей оптимального синтезированного управления. Решение новой задачи состоит из двух этапов, но после решения сложной задачи общего синтеза на первом этапе задача оптимального управления существенно упрощается и редуцируется к задаче конечномерной оптимизации, в которой необходимо найти конечное число координат определяющих точек. Приведен пример решения задачи оптимального синтезированного управления.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (№ 19-11-00258).

Библиографический список

1. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – 4-е изд. – Москва : Наука, 1983. – 392 с.
2. Федоренко, Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р. П. Федоренко. – Москва : Наука, 1978. – 488 с.
3. Беллман, Р. Процессы регулирования с адаптацией / Р. Беллман. – Москва : Наука, 1964. – 360 с.

4. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с.
5. Малкин, И. Г. Теория устойчивости движения / И. Г. Малкин. – 4-е изд. – Москва : URSS, 2017. – 432 с.
6. Янг, Л. Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления / Л. Янг. – Москва : Мир, 1974. – 488 с.
7. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский. – Москва : Наука, 1969. – 408 с.
8. Халил, Х. К. Нелинейные системы / Х. К. Халил. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2009. – 814 с.
9. Колесников, А. А. Методы АКАР и бэкстепинг в задачах синтеза нелинейных систем управления / А. А. Колесников, А. А. Колесников, А. А. Кузьменко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 7. – С. 435–445.
10. Дивеев, А. И. Численные методы решения задачи синтеза управления / А. И. Дивеев. – Москва : РУДН, 2019. – 192 с.
11. Дивеев, А. И. Исследования практической сходимости эволюционных алгоритмов оптимального программного управления колесным роботом / А. И. Дивеев, С. В. Константинов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 4. – С. 80–106.
12. Дивеев, А. И. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 40–47.

References

1. Pontryagin L. S., Boltyanskiy V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. 4th ed. Moscow: Nauka, 1983, 392 p. [In Russian]
2. Fedorenko R. P. *Priblizhennoe reshenie zadach optimal'nogo upravleniya* [Approximate solution of optimal control problems]. Moscow: Nauka, 1978, 488 p. [In Russian]
3. Bellman R. *Protssesy regulirovaniya s adaptatsiyey* [Regulatory processes with adaptation]. Moscow: Nauka, 1964, 360 p. [In Russian]
4. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovaniye* [Dynamic programming]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1960, 400 p. [In Russian]
5. Malkin I. G. *Teoriya ustoychivosti dvizheniya* [The theory of stability of motion]. 4th ed. Moscow: URSS, 2017, 432 p. [In Russian]
6. Yang L. *Lektsii po variatsionnomu ischisleniyu i teorii optimal'nogo upravleniya* [Lectures on calculus of variations and optimal control theory]. Moscow: Mir, 1974, 488 p. [In Russian]
7. Boltyanskiy V. G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Mathematical methods of optimal control]. Moscow: Nauka, 1969, 408 p. [In Russian]
8. Khalil Kh. K. *Nelineynye sistemy* [Nonlinear system]. Moscow; Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2009, 814 p. [In Russian]
9. Kolesnikov A. A., Kolesnikov A. A., Kuz'menko A. A. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, management]. 2016, vol. 17, no. 7, pp. 435–445. [In Russian]
10. Diveev A. I. *Chislennyye metody resheniya zadachi sinteza upravleniya* [Numerical methods for solving the problem of control synthesis]. Moscow: RUDN, 2019, 192 p. [In Russian]
11. Diveev A. I., Konstantinov S. V. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems]. 2017, no. 4, pp. 80–106. [In Russian]
12. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4 (24), pp. 40–47. [In Russian]

Дивеев Асхат Ибрагимович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
начальник отдела управления
робототехническими устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 42, корп. 2)
E-mail: aidiveev@mail.ru

Diveev Askhat Ibragimovich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher, head of the department
of robotics control,
Federal Research Center “Computer Science
and Control” of the Russian Academy of Sciences
(42/2 Vavilova street, Moscow, Russia)

Шмалько Елизавета Юрьевна

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
отдел управления робототехническими
устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 42, корп. 2)
E-mail: e.shmalko@gmail.com

Shmalko Elizaveta Yurievna

candidate of technical sciences, senior researcher,
department of robotics control,
Federal Research Center “Computer Science
and Control” of the Russian Academy of Sciences
(42/2 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Дивеев, А. И. К практической реализации решения задачи оптимального управления / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 37–46. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-6.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 621.3.019

DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-7

Н. И. Сидняев, К. А. Уракова

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ДОПУСТИМОМУ УРОВНЮ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

N. I. Sidnyaev, K. A. Urakova

METHOD FOR DETERMINING THE FREQUENCY OF DIAGNOSING SPACE SYSTEMS BY THE ACCEPTABLE LEVEL OF PROBABILITY OF UPTIME

Аннотация. Представлены методики прогнозирования надежности создаваемых устройств, проектирование устройств с заданной надежностью и сравнение надежности различных КС. С этой целью излагаются фундаментальные вопросы из теории надежности для проектирования КС, методы сбора и обработки данных о надежности аппаратуры по результатам эксплуатации и специальных испытаний на надежность. Разработаны методы, математические модели и проведен анализ структуры аппаратуры на этапе проектирования и при изготовлении. Приведены расчетные соотношения при различных видах резервирования в испытаниях, продления сроков эксплуатации блоков КА, основа которых – методология оценки остаточного ресурса. Систематизированы и изучены существующие методы анализа надежности. Изложены проблемы неопределенности информации по входным данным при расчетах классическими методами. Изучено влияние отклонения внешних воздействий от номинальных значений, непостоянность интенсив-

Abstract. The article presents methods for predicting the reliability of created devices, designing devices with a given reliability and comparing the reliability of various space systems. To this end, fundamental questions from the theory of reliability for the design of space systems, methods for collecting and processing data on the reliability of equipment based on the results of operation and special reliability tests are stated. Methods, mathematical models are developed and an analysis of the structure of the equipment at the design stage and in the manufacture. Design ratios are given for various types of redundancy in tests, extending the life of spacecraft blocks, the basis of which is the methodology for estimating the residual life. The existing methods of reliability analysis are systematized and studied. The problems of uncertainty of information on input data in the calculations by classical methods are described. The influence of the deviation of external influences from the nominal values, the inconsistency of the failure rate, the nonlinear nature of the influence of external factors on reliability are studied. The

ности отказов, нелинейный характер влияния внешних факторов на надежность. Исследован характер влияния внешних факторов на надежность и степень учета факторов в существующих методах. Отмечено, что качественные, организационно-технические (конструктивные и программные) требования по надежности, задаваемые в ТЗ для каждой стадии создания элементов КС в целом, должны выполняться и подтверждаться на соответствующей стадии работ. Представлены методики оценки ресурса технических объектов, среди которых важное место занимают методики, основанные на физических предпосылках расходования ресурса. Отмечена важность экономического аспекта исследования проблемы продления сроков эксплуатации КС. Постулируется, что принцип сравнимости результатов количественных оценок ТС предполагает использование единого состава исходных данных за определенный отчетный период времени, единство используемых обобщенных и частных показателей, а также единство принятых допущений и ограничений. Подчеркнуто, что все отказы и неисправности, выявленные на комплексе, независимо от того, повлияли ли они на результаты испытаний или нет, должны быть учтены, на них должны быть составлены информационные документы (сообщения о неисправности или рекламационные акты, акты исследования, подтвержденные протоколами исследования). Системный подход к анализу и оценке ТС предполагает комплексное рассмотрение на каждом этапе результатов анализа обобщенных и частных показателей технического состояния как единой системы взаимосвязанных величин и принятие решения на основе обобщенных показателей с использованием значимости частных показателей. Рассмотрены сущности методов определения периодичности технического состояния, указаны условия применения, а также достоинства и недостатки каждого метода. Показано применение общей и поэлементной постановки оценки состояния сложных механизмов с использованием диагностической матрицы и теории распознавания с целью определения состояния технических объектов. Описаны этапы общего процесса диагностирования объектов, состоящие из определения изменения параметров при воздействии на элементы объекта и дальнейшей обработки полученных результатов с применением методов синтеза и анализа.

Ключевые слова: надежность, методики, ресурс, проектирование, космический аппарат, оценка ресурса.

nature of the influence of external factors on the reliability and degree of consideration of factors in existing methods is investigated. It is noted that the qualitative, organizational and technical (structural and software) reliability requirements specified in the technical specifications for each stage of the creation of elements of space systems as a whole should be fulfilled and confirmed at the corresponding stage of work. Methods of assessing the resource of technical objects are presented, among which an important place is occupied by methods based on the physical premises of resource consumption. The importance of the economic aspect of the study of the problem of extending the life of space systems is noted. It is postulated that the principle of comparability of the results of quantitative assessments of technical systems involves the use of a single composition of the source data for a certain reporting period of time, the unity of the generalized and particular indicators used, as well as the unity of the assumptions and limitations adopted. It was emphasized that all failures and malfunctions detected at the complex, regardless of whether they affected the test results or not, should be taken into account, information documents should be drawn up on them (reports of malfunctions or complaints, research reports confirmed by research protocols) A systematic approach to the analysis and evaluation of technical systems involves a comprehensive review at each stage of the analysis of generalized and particular indicators of the technical condition as a single system of interrelated variables and decision-making based on generalized indicators using the significance of particular indicators. The essence of the methods for determining the periodicity of the technical condition is considered, the conditions of application, as well as the advantages and disadvantages of each method are indicated. The application of the general and element-wise statement of the state assessment of complex mechanisms using the diagnostic matrix and recognition theory in order to determine the state of technical objects is shown. The stages of the general process of diagnosing objects are described, consisting of determining changes in the parameters when exposed to the elements of the object and further processing the results using synthesis and analysis methods.

Keywords: reliability, techniques, resource, design, spacecraft, resource assessment.

Введение

Оценка технического состояния космических комплексов (КК) является важной задачей для предприятия-разработчика (изготовителя) при проведении анализа и оценки технического состояния КК и его составных частей разработки и выпуска отчетов о техническом состоянии КК на этапах производства и эксплуатации.

Существующие методики устанавливают основные принципы и методы анализа, единую систему показателей технического состояния КК, а также порядок проведения анализа и оценки тех-

нического состояния, формирование выводов и рекомендаций с целью повышения существующих показателей технического состояния КК и их составных частей. Совокупность стационарных и подвижных технических средств и сооружений, предназначенных для хранения, сборки, проверки, заправки, технического обслуживания ракеты космического назначения и (или) ее составных частей (ракеты-носителя, разгонного блока, космического аппарата) и подготовки ракеты космического назначения, к транспортированию на стартовый комплекс требуют систематической проверки. Совокупность стационарных и подвижных технических средств и сооружений с техническими системами, предназначенными для обеспечения готовности, подготовки и пуска ракет космического назначения нуждаются в методологическом обеспечении. В изделие КА входят: система, аппаратура, агрегат, прибор, блок, узел, изделие электронной компонентной базы, комплектующий элемент, программное изделие, входящие в состав КА или любой его структуры. Совокупность свойств, характеризующих его способность обеспечивать в процессе функционирования получение заданного в ТТЗ (ТЗ) выходного эффекта при заданных условиях и режимах эксплуатации. Отказ КА трактуется как событие, состоящее в том, что при функционировании КА не достигается заданный уровень выходного эффекта. Важную роль играет экспериментальная отработка, которая подразумевает совокупность работ, определенных комплексной программой экспериментальной отработки и выполняемых при испытаниях на моделях, макетах, опытных образцах с целью проверки соответствия характеристик изделий требованиям ТТЗ (ТЗ), обеспечения функционирования изделий, определения запасов их работоспособности в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации. Важно техническое состояние (КА), которое трактуется как совокупность подверженных изменению количественных и (или) качественных параметров, характеризующих способность комплекса (изделия) выполнять при определенных условиях в заданный момент или период времени присущие ему функции на установленном в НД уровне с учетом срока активного существования, а именно календарный отрезок времени с момента выведения (или принятия в эксплуатацию в составе орбитальной системы КА) до момента прекращения использования КА по целевому назначению из-за достижения предельного состояния (необратимого снижения выходного эффекта КА ниже допустимого уровня). Срок активного существования КА, при котором предельное состояние достигается из-за наступления деградационных отказов или исчерпания расходуемых компонентов бортовых систем КА, при отсутствии конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов. Математическая модель, воспроизводящая реальные свойства, связи и взаимодействие изделий КА и внешние условия в процессе функционирования КС (КК, изделия) и позволяющая исследовать различные свойства КС (КК, изделия). В соответствии с требованиями Положения РК-11-КТ организации, участвующие в создании, серийном (единичном) производстве и эксплуатации комплексов и их изделий, должны проводить работы по сбору, обработке, анализу, обобщению, представлению (обмену) информации о результатах отработки, о техническом состоянии и надежности комплексов и их изделий в соответствии с требованиями ГОСТ РО 1410-002-2010. Основными целями проведения анализа технического состояния КК и его составных частей являются оценка и установление тенденций изменений за определенный промежуток времени ТС КК и его составных частей, своевременная разработка рекомендаций и профилактических мероприятий, направленных на обеспечение требуемого уровня ТС и надежности (при отработке СЧ КК), поддержание или повышение этого уровня (при серийном производстве), а также контроль реализации выработанных мероприятий [1].

При анализе и оценке технического состояния КК следует придерживаться следующих основных принципов сравнимости результатов количественной оценки технического состояния КК и его изделий; полнота и достоверность информации об отказах и неисправностях, выявленных в течение отчетного периода; системного подхода к использованию показателей ТС КК и входящих в его состав составных частей (СЧ) и основных изделий, а также выбор последовательности этапов проведения анализа и оценка технического состояния.

Принцип сравнимости результатов количественных оценок ТС предполагает использование единого состава исходных данных за определенный отчетный период времени, единство используемых обобщенных и частных показателей, а также единство принятых допущений и ограничений. Вследствие этого показатели технического состояния могут быть распространены не только на различные модификации, виды, типы изделий (составных частей) КА, но и, собственно, на различные комплексы, рассчитаны за соответствующие отчетные промежутки времени и должны быть сравнимы между собой. Принцип полноты и достоверности информации об отказах и неисправностях, выявленных в течение отчетного периода времени, предполагает, что исходные данные, используемые

для проведения анализа и оценок ТС полно и достоверно характеризуют имевшие место события и обеспечивают получение объективных оценок технического состояния КК. Все отказы и неисправности, выявленные на комплексе, независимо от того, повлияли ли они на результаты испытаний или нет, должны быть учтены, на них должны быть составлены информационные документы (сообщения о неисправности или рекламационные акты, акты исследования, подтвержденные протоколами исследования). В исходные данные включают все отказы и неисправности, выявленные на готовых изделиях в течение отчетного периода времени (по дате выявления неисправности или отказа).

Параметры технического состояния космических комплексов и их изделий

Системный подход к анализу и оценке функционально связанных изделий КС предполагает комплексное рассмотрение на каждом этапе результатов анализа обобщенных и частных показателей технического состояния как единой системы взаимосвязанных величин и принятие решения на основе обобщенных показателей с использованием значимости частных показателей. Вероятность нахождения СЧ КК в исправном состоянии $P_{0итс}(t)$ при проведении контроля (априорная вероятность) в моменты времени t . Вероятность нахождения СЧ КК в работоспособном состоянии $P_{0ртс}(t)$ при проведении контроля в моменты времени t^* . Перечисленные показатели характеризуют надежность СЧ КК, эффективность мероприятий наземной экспериментальной отработки (НЭО), заводских контрольных испытаний, включая ПСИ изделий (составных частей) КК, допущенных к эксплуатации (летным испытаниям). Данные показатели носят априорный характер, т.е. позволяют утверждать в вероятностном смысле, в каком состоянии (исправном, работоспособном) находится изделие до проведения контроля, которое обеспечивается действующей системой качества и надежности на предприятии и в эксплуатирующей организации.

Оценка этих показателей осуществляется с использованием структурной схемы надежности (ССН). Вероятность нахождения СЧ КК в исправном состоянии $P_{0итс}(t)$ после проведения контроля (апостериорная вероятность) в моменты времени t^* контроля с положительными результатами и допущенных к эксплуатации (применению). Вероятность нахождения СЧ КК в работоспособном состоянии $P_{0ртс}(t)$ после проведения контроля в моменты времени t^* с положительными результатами и допущенного к эксплуатации (применению).

Эти показатели носят апостериорный характер, т.е. позволяют утверждать, в каком состоянии (исправном, работоспособном) в вероятностном смысле находится изделие после контроля, завершившегося с положительными результатами и допущенного к эксплуатации. В зависимости от задач анализа данные показатели могут рассматриваться и как показатели достоверности (эффективности) контроля СЧ КК и как показатели надежности КК. В частности, представляют частный случай нестационарного коэффициента готовности изделия, а именно, вероятность того, что не в какой-либо произвольный как в классическом случае, а именно, в конкретный момент времени t^* проведения контроля (либо после его проведения) изделие будет находиться в исправном (работоспособном) состоянии. Учитывая, что контроль (проверки, испытания) СЧ КК на ТК и СК, как правило, предшествует принятию решений о проведении запусков КА, наличие оценок указанных показателей для данного момента проведения контроля t позволяет принять либо снять распространенное на практике при оценке надежности допущение об исправности СЧ КК в начальный момент применения (пуска) КА. С другой стороны, используя терминологию и понятия надежности комплексов, принятые в ГОСТ РО 1410-001-2009 и определяемые через выходной эффект, показатели $P_{итс}(t)$ и $P_{ртс}(t)$ можно рассматривать как показатели надежности СЧ КК в целом, так как обеспечение к моменту запуска КА их исправности – это цель функционирования КК на этапе подготовки СЧ КК на ТК и СК. Указанные показатели выступают в качестве меры получаемого на этапе подготовки на ТК и СК выходного эффекта КК. Относительное количество отказов и неисправностей СЧ КК q_3 , выявленных при подготовке СЧ КК к пуску, в процессе подготовки и в полете на один КА (РН, РБ), характеризует качество создания, производства СЧ КК. Относительное количество отказов, выявленных в полете $q_{отк}$, характеризует эффективность контроля технического состояния СЧ КК на ТК и СК. Относительное количество неисправностей, выявленных при производ-

стве $q_{\text{пр}}$, характеризует систему контроля качества производства (применение нормативных документов, отраслевых стандартов, применяемые технологии, система контроля качества). Относительное количество конструктивных неисправностей $K_{\text{к}}$ характеризует полноту отработки и качество конструкторской и эксплуатационной документации. Относительное количество производственных неисправностей $K_{\text{пр}}$ характеризует качество изготовления и контроля, качество технологической документации. Относительное количество эксплуатационных неисправностей $K_{\text{э}}$ характеризует качество обученности персонала, эксплуатирующего технику, качество системы эксплуатации. Коэффициент эффективности $\eta_{\text{пр}}$ контроля – качество изготовления изделий СЧ КК. Относительное количество отказов и неисправностей, причина которых не установлена, $K_{\text{пну}}$ характеризует глубину исследования причин неисправностей и отказов. Относительное количество «закрытых» неисправностей $q_{\text{з}}$ (или коэффициент закрытия неисправностей, та же величина, выраженная в процентах) характеризует оперативность и полноту исследований и устранения причин неисправностей. Относительное количество повторяющихся неисправностей $K_{\text{повт}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности КК. Относительное количество повторяющихся неисправностей по конструктивной причине $K_{\text{повтК}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности за счет снижения количества конструкционных отказов изделий СЧ КК. Относительное количество повторяющихся неисправностей по производственной причине $K_{\text{повтПр}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности за счет снижения количества производственных отказов изделий СЧ КА. Относительное количество повторяющихся неисправностей по эксплуатационной причине $K_{\text{повтЭк}}$ характеризует эффективность принятых мер по повышению уровня технического состояния и надежности за счет снижения количества эксплуатационных отказов изделий СЧ КА [2].

Расчетные соотношения для определения обобщенных показателей ТС КК

Оценка обобщенных показателей осуществляется с использованием ССН. Каждая из систем СЧ КК может быть представлена в виде функционально и структурно объединенных приборов (агрегатов), имеющих резерв. Каждую систему в ССН будем рассматривать как блок, а входящие в бортовую систему приборы, агрегаты с резервными комплектами – как элементы ССН. Приборы и агрегаты некоторых бортовых систем могут и не иметь резерва. В этом случае такая система в ССН будет рассматриваться как блок и как элемент одновременно. Таким образом, ССН СЧ КК будет представлять собой схему, состоящую из M блоков j -х типов и N элементов i -х типов. Точечная оценка вероятности нахождения СЧ КК в исправном состоянии при проведении контроля в моменты времени t^* определяется по статистическим данным по формуле [3]

$$\hat{P}_{\text{итс}}(t) = \prod_{i=1}^N \hat{P}_{\text{итс}_i}(t),$$

где $\hat{P}_{\text{итс}}(t)$ – точечная оценка вероятности исправного состояния (ВИС) СЧ КК; $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ – точечная оценка ВИС i -го элемента ССН СЧ КК; N – общее число резервированных и нерезервированных элементов структурной схемы надежности СЧ КК; t^* – моменты времени, в которые проводится контроль ТС (при проведении ПСИ на ЗИ, при проведении технического обслуживания, при подготовке к пуску КА (РН, РБ) на ТК и на СК). В свою очередь, оценки $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ на этапах ЛИ и эксплуатации определяются по имеющимся статистическим данным, используя выражение: $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t) = 1 - m_i / n_i$, где m_i – суммарное число неисправных элементов i -го типа, выявленных и устраненных при инструментальном контроле (проверках) ТС в соответствующие моменты времени t^* (при проведении ПСИ на ЗИ, при проведении технического обслуживания, при подготовке КА (РН, РБ) на ТК(СК) к пуску); n_i – суммарное количество проверок, проведенных в соответствующие моменты времени t , за отчетный период [4].

Вероятность нахождения КА (РН, РБ) в работоспособном состоянии при проведении контроля в моменты времени t^* на этапах ЛИ и эксплуатации определяется в виде ее точечной оценки по формуле

$$\hat{P}_{0\text{рмс}}(t) = \prod_{j=1}^M \hat{P}_{0\text{рмс}_j}(t),$$

где M – число блоков ССН на уровне составных частей КА; $\hat{P}_{0\text{рмс}_j}(t)$ – точечная оценка вероятности работоспособного состояния (ВРС) i -го блока ССН КА (РН, РБ) в моменты времени t^* ; $\hat{P}_{0\text{рмс}}(t)$ – точечная оценка ВРС КА; t^* – моменты времени, в которые осуществляется контроль ТС.

Точечная оценка показателя работоспособного состояния j -го блока ССН СЧ КК (в случае наличия резерва кратности K) определяется по формуле (в общем случае неравно надежных элементов в составе блока)

$$\hat{P}_{0\text{рмс}_j}(t) = 1 - \prod_{l=1}^K \hat{P}_{0lj},$$

где \hat{P}_{0lj} – оценка показателя работоспособного состояния l -го элемента в j -м блоке ССН СЧ КК; K – число элементов в j -м блоке.

В свою очередь $\hat{P}_{0lj}(t) = 1 - m_{lj} / n_{lj}$, где m_{lj} – суммарное число отказов l -го элемента j -го блока, выявленных при проверках ТС в моменты времени t ; n_{lj} – общее число проверок соответствующей номенклатуры l -х элементов j -го блока в моменты времени t^* . Здесь принимается допущение о наличии не более одного отказа l -го элемента при контроле в момент t^* . Точечная оценка вероятности нахождения СЧ КК в исправном состоянии после проведения контроля в моменты времени t^* (апостериорная вероятность) определяется по статистическим данным по формуле

$$\hat{P}_{\text{итс}}(t) = \prod_{i=1}^N \hat{P}_{\text{итс}_i}(t),$$

где $\hat{P}_{\text{итс}}(t)$ – точечная оценка вероятности исправного состояния (ВИС) КА после контроля; $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ – точечная оценка ВИС i -го элемента ССН КА; N – общее число резервированных и нерезервированных элементов ССН КА.

Оценки $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t)$ на этапах ЛИ и эксплуатации определяются по имеющимся статистическим данным, используя выражение: $\hat{P}_{\text{итс}_i}(t) = 1 - m_i / n_i$, где m_i – суммарное число неисправных элементов i -го типа, не выявленных при контроле (проверках) ТС в соответствующие моменты времени t (при проведении ПСИ на ЗИ, при подготовке СЧ КК на ТК(СК) к пуску) и проявившихся на последующих этапах эксплуатации; n_i – суммарное количество проверок соответствующей номенклатуры (ПСИ на ЗИ либо проверки на ТК, либо проверки на СК), проведенных в соответствующие моменты времени t^* , за отчетный период.

Здесь принимается допущение о наличии не более одного отказа элемента i -го типа в момент t . Вероятность нахождения СЧ КК в работоспособном состоянии при проведении контроля в моменты времени на этапах ЛИ и эксплуатации определяется в виде ее точечной оценки показателя по статистическим данным по формуле

$$\hat{P}_{0\text{рмс}}(t) = \prod_{j=1}^M \hat{P}_{0\text{рмс}_j}(t),$$

где M – число блоков ССН на уровне составных частей СЧ КК; $\hat{P}_{0\text{рмс}_j}(t)$ – точечная оценка вероятности работоспособного состояния (ВРС) j -го блока ССН СЧ КК после контроля, проведенного в

соответствующие моменты времени t ; $\hat{P}_{0\text{рмс}}(t)$ – точечная оценка ВРС СЧ КК; t^* – моменты времени, в которые осуществляется контроль ТС (ПСИ, ТК, СК). Точечная оценка показателя работоспособного состояния j -го блока ССН СЧ КК (в случае наличия резерва кратности K) определяется по формуле (в общем случае неравнонадежных элементов блока):

$$\hat{P}_{\text{рмс}_j}(t) = 1 - \prod_{l=1}^K (1 - \hat{P}_{lj}(t)),$$

где $\hat{P}_{lj}(t)$ – оценка показателя работоспособного состояния l -го элемента в j -м блоке ССН СЧ КК, признанной годном по результатам контроля (ПСИ, ТК, СК); K – число элементов в j -м блоке. В свою очередь $\hat{P}_{lj}(t) = 1 - m_{lj} / n_{lj}$, где m_{lj} – суммарное число отказов l -х элементов j -го блока, не выявленных при контроле ТС в моменты времени t^* и проявившихся при последующей эксплуатации (ТК, СК, полет); n_{lj} – общее число проверок определенной номенклатуры (ПСИ, ТК, СК) l -го элемента j -го блока в соответствующие моменты времени t .

Здесь принимается допущение о наличии не более одного отказа l -го элемента при контроле в момент t^* . Оценки апостериорных ВИС и ВРС СЧ КК на этапе НЭО проводятся расчетно-экспериментальным методом. Частота успешных пусков РН \bar{P} определяется по формуле: $\bar{P} = 1 - m_{\text{РН}} / n$, где $m_{\text{РН}}$ – количество неуспешных пусков; n – общее количество пусков.

Технический уровень СЧ КК Y : $Y = N / (N + G)$, где G – количество неисправных изделий СЧ КК, выявленных в контрольно-испытательной станции (КИС) и эксплуатирующей организации (ЭО); N – количество изделий СЧ КК, поступивших в ЭО [5].

Расчетные соотношения для определения частных показателей ТС КК

Относительное количество отказов и неисправностей СЧ КК q_3 , выявленных при подготовке СЧ КК к пуску, в процессе подготовки и в полете на одну РН: $q_3 = Q_{\text{экс}} / \gamma$, где $Q_{\text{экс}}$ – количество отказов и неисправностей, выявленных на ТК, СК и в полете; γ – количество СЧ КК, подготавливаемых к пуску.

Относительное количество отказов, выявленных в полете $q_{\text{отк}}$: $q_{\text{отк}} = Q_{\text{отк}} / \gamma$, где $Q_{\text{отк}}$ – количество отказов, выявленных в полете приведших к неуспешным или частично неуспешным пускам. Относительное количество неисправностей, выявленных при производстве $q_{\text{пр}}$:

$$q_{\text{пр}} = \frac{1}{N_{\text{пр}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{пр}}} Q_{\text{пр}_i},$$

где $Q_{\text{пр}}$ – количество неисправностей, выявленных при производстве; $N_{\text{пр}}$ – количество произведенных запусков СЧ КК.

Относительное количество конструктивных неисправностей K_k : $K_k = M_k / M_3$, где M_k – количество «закрытых» конструктивных неисправностей; M_3 – количество «закрытых» неисправностей. Относительное количество производственных неисправностей $K_{\text{пр}}$: $K_{\text{пр}} = M_{\text{пр}} / M_3$, где $M_{\text{пр}}$ – количество «закрытых» производственных неисправностей. Относительное количество эксплуатационных неисправностей K_3 : $K_3 = M_3 / M_3$, где M_3 – количество «закрытых» эксплуатационных неисправностей. Коэффициент эффективности $\eta_{\text{пр}}$ контроля качества изготовления изделий (СЧ) КРК: $\eta_{\text{пр}} = Q_{\text{пр}} / (Q_{\text{пр}} + Q_{\text{прп}} + Q_{\text{пол}})$, где $Q_{\text{пр}}$ – количество отказов и неисправностей, выявленных при испытаниях изделий в процессе производства (входной контроль, сборка, КИС, ПСИ); $Q_{\text{прп}}$, $Q_{\text{пол}}$ – количество отказов и неисправностей производственного характера, выявленных при испытаниях изделий в процессе подготовки СЧ КК на ТК и СК, полете соответственно. Коэффициент эффективности $\eta_{\text{эк}}$ эксплуатационного контроля изделий СЧ КК: $\eta_{\text{эк}} = Q_{\text{эк}} / (Q_{\text{эк}} + Q_{\text{пэ}} + Q_{\text{полэ}})$, где

$Q_{ЭК}$ – количество отказов и неисправностей, выявленных при испытаниях изделий в процессе технического обслуживания и подготовки к пуску на ТК и СК; $Q_{ПЭ}$, $Q_{ПолЭ}$ – количество отказов и неисправностей производственного и эксплуатационного характера, выявленных при испытаниях изделий в процессе подготовки СЧ КК на ТК и СК, и в полете соответственно. Относительное количество отказов и неисправностей, причина которых не установлена, $K_{ПНУ} : K_{ПНУ} = M_{ПНУ} / M_3$, где $M_{ПНУ}$ – количество неисправностей и отказов «закрытых» с неустановленной причиной.

Относительное количество «закрытых» неисправностей q_3 (или коэффициент закрытия неисправностей, та же величина, выраженная в процентах): $q_3 = M_3 / Q_0$, где Q_0 – общее количество неисправностей, выявленных в СЧ КК за отчетный период. Относительное количество повторяющихся неисправностей $K_{Повт} : K_{Повт} = M_{Повт} / M_3$, где $M_{Повт}$ – общее количество повторяющихся неисправностей, выявленных на одну СЧ КК за отчетный период [6].

Относительное количество повторяющихся неисправностей по конструктивной причине $K_{ПовтК} : K_{ПовтК} = M_{ПовтК} / M_3$, где $M_{ПовтК}$ – количество повторяющихся неисправностей по конструктивной причине.

Относительное количество повторяющихся неисправностей по производственной причине $K_{ПовтПр} : K_{ПовтПр} = M_{ПовтПр} / M_3$, где $M_{ПовтПр}$ – общее количество повторяющихся неисправностей по производственной причине.

Относительное количество повторяющихся неисправностей по эксплуатационной причине $K_{ПовтЭ} : K_{ПовтЭ} = M_{ПовтЭ} / M_3$, где $M_{ПовтЭ}$ – общее количество повторяющихся неисправностей по эксплуатационной причине.

Все относительные показатели могут быть выражены в процентах путем умножения на 100 рассчитанной по соответствующим формулам величины показателя. Для построения ССН необходимо иметь схему деления СЧ КК, знать функциональные связи и взаимодействие между элементами схемы деления. По результатам ЛИ и эксплуатации необходимо иметь базу данных о техническом состоянии и надежности СЧ КК. Как правило, ведение базы данных должно осуществляться с использованием вычислительной техники. Банк данных должен храниться в течение всего периода эксплуатации СЧ КК. Обязательному учету и анализу подлежат все отказы и неисправности опытных и серийных изделий (включая дефекты, отступления от конструкторской и технологической документации, замечания), независимо от того, повлияли они на результаты испытаний (применение изделий по назначению) или не повлияли. При этом организации должны проводить всесторонние исследования причины отказов и неисправностей с учетом заинтересованных организаций и ПЗ на них.

Статистический метод определения периодичности диагностирования по допустимому уровню вероятности безотказной работы

Зная оптимальную периодичность диагностирования СЧ КК, можно технологически группировать отдельные диагностические операции, приурочивая их к соответствующим видам технического обслуживания. При этом объемы ТО претерпят корректировку, а эффективность его повысится.

В основе определения периодичности диагностирования l_d так же, как и при определении регламентной периодичности технического обслуживания l_p , лежат закономерности изменения технического состояния и экономические показатели. Однако l_d нельзя полностью отождествлять с l_p . Принципиально они различаются тем, что l_p находят из закономерностей отказов для регламентного ТО без учета затрат на диагностирование, а l_d – из закономерностей достижения механизмами предельных и упреждающих величин диагностических параметров с учетом затрат на диагностирование. Это различие между l_p и l_d определяет различие между традиционными контрольными работами, которые являются дополнением к уже запланированному ТО, и диагностированием, которое само планирует определенную часть ТО. При отсутствии данных, полученных на базе полномасштабного диагностирования, его временно приурочивают к существующей периодичности l_p .

Принципы определения периодичности l_p и l_d можно классифицировать по области применения (для единичных объектов и для совокупностей), по критерию оптимизации (безотказность, удельные затраты, коэффициент технической готовности), по ритмичности (жесткая равномерная периодичность, увеличенное время эксплуатации до первого контроля и учащение по мере наработки).

В области эксплуатации КС наиболее распространенными являются следующие методы определения l_d : статистический по допустимому уровню вероятности безотказной работы; индивидуальный по частной реализации диагностического параметра; экономико-вероятностный по совокупности реализаций диагностического параметра; экономико-вероятностный по дискретным значениям диагностического параметра. Остановимся на кратком описании тех методов, которые предназначены непосредственно для определения l_d . Указанный метод (рис. 1,а), т.е. по кривой убыви, прост и удобен. Однако этот метод неточен и неэкономичен, особенно при больших вариациях изменения технического состояния объекта. Он целесообразен для случаев технического обслуживания КС без диагностирования [7].

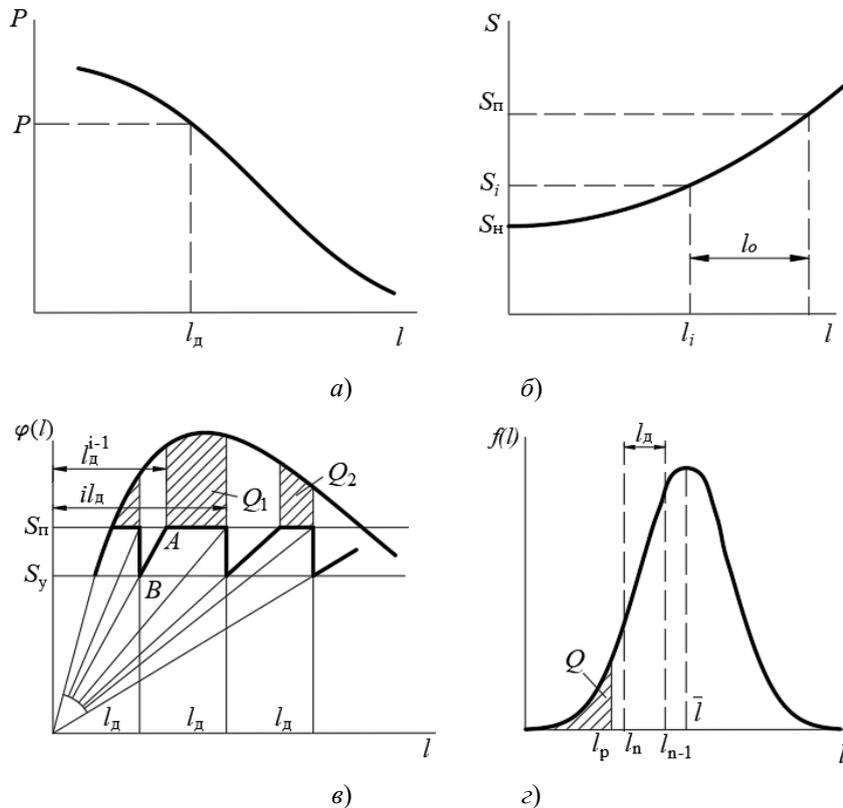


Рис. 1. Схема методов определения межконтрольных наработок:

- а – по заданной вероятности отказа; P – вероятность безотказной работы; l – наработка;
- б – по частной реализации, т.е. зависимости диагностического параметра S от наработки l ;
- в – по совокупности реализаций; $\varphi(l)$ – плотность распределения ресурса; з – по предотказному состоянию

Метод определения l_d по частной реализации (экстраполяционный метод) является при соответствующих условиях наиболее точным и достоверным (рис. 1,б). Сущность указанного метода заключается в решении относительно l_d функции, аппроксимирующей изменение диагностического параметра $S(l)$ от начальной S_n до предельной S_n величины. Пользуясь этой функцией, можно определить полный ресурс КС

$$l_d = \alpha \sqrt{\frac{|S_n - S_n|}{\nu}} \tag{1}$$

и их остаточный ресурс l_0 после некоторой наработки l_i

$$l_o = l_i \left(\sqrt[\alpha]{\frac{|S_{ii} - S_{ii}|}{|S_i - S_{ii}|}} - 1 \right). \tag{2}$$

Здесь S_i – величина диагностического параметра после наработки l_i . Если диагностирование выполняют в системе заданной периодичности l_p , то остаточный ресурс l_o сравнивают с l_p и делают заключение о готовности КС (при $l_o > l_p$) или его потребности в ремонте (при $l_o < l_p$). Прогнозирование можно упростить, заменяя S_{ii} его упреждающим нормативом S_y , т.е. ужесточая S_{ii} на величину приращения диагностического параметра за период l_p .

Практическое применение метода определения l_d по частной реализации (при массовой эксплуатации) затрудняется необходимостью постоянного вычисления S_y для каждого механизма. Метод этот может быть использован для относительно дорогих механизмов, путем измерений параметров их выгорания.

Экономико-вероятностный метод определения l_d по совокупности реализаций диагностического параметра позволяет определить периодичность диагностирования, при которой можно пользоваться постоянной, единой для всей совокупности объектов величиной допустимого (упреждающего) норматива. Графическая интерпретация данной модели определения l_d и S_y показана на рис. 1,в. Метод статистического определения l_d по совокупности реализаций при заданных S_{ii} , S_y , $\varphi(l)$, $S = f(l)$, является универсальным. Сущность его заключается в оптимизации l_d по критерию минимума суммарных удельных затрат $C(l_d, S_y)$ на ремонт, профилактику и диагностирование. Из рис. 1 видно, что при увеличении l_d вероятности пропусков отказов, выраженные заштрихованными площадками Q_1, Q_2, \dots , возрастут. При этом число отказов, а следовательно, и затраты на ремонт увеличатся, а число плановых обслуживаний и диагностирований соответственно уменьшится. При уменьшении l_d будет наблюдаться обратная картина. Зная плотность распределения $\varphi(l)$, можно определить суммарную вероятность отказов [8, 9]:

$$Q(l_d, S_y) = \sum_{i=1}^n \int_{l^{i-1}}^{l^i} \varphi(l) dl, \tag{3}$$

где i – порядковый номер диагностирования; n – последний межконтрольный период, в котором могут быть отказы. Величину l^{i-1} можно определить из подобия прямоугольных треугольников $S_{ii}AO$ и S_yBO (см. рис. 1,в). При линейных реализациях ($\alpha = 1$) можно пользоваться уравнением $l^{i-1} = S_{ii}(i-1)l_d / S_y$.

При этом $n = 1 / (1 - S_y / S_{ii})$. При нелинейных реализациях ($\alpha \neq 1$):

$$l^{i-1} = \sqrt[\alpha]{S_{ii} / S_y} (i-1)l_d; \tag{4}$$

$$n = \frac{1}{1 - \sqrt[\alpha]{S_y / S_{ii}}}. \tag{5}$$

Пользуясь критерием минимума затрат, можно записать

$$C(l_d, S_y) = \min \left\{ \frac{cQ(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{d[1 - Q(l_d, S_y)]}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{c_d k(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} \right\}, \tag{6}$$

где c – стоимость аварийного ремонта; d – стоимость предупредительного ремонта; c_d – стоимость диагностической проверки; $k(l_d, S_y)$ – среднее число проверок до восстановления; $l_\phi(l_d, S_y)$ –

фактический ресурс, т.е. среднее время эксплуатации до замены. Очевидно, первый член уравнения (6) определяет затраты на ремонт, второй – на профилактику, а третий – на диагностирование.

При постоянном S_y рост l_d вызовет повышение вероятности аварийных ремонтов Q и затрат на них, так как l_ϕ изменится незначительно. При постоянном l_d уменьшение S_y приведет к снижению Q , но при этом существенно уменьшится l_ϕ , а $C(l_d, S_y)$ возрастет. Наибольшее $l_\phi(l_d, S_y)$ можно получить, уменьшая l_d и увеличивая S_y . Однако при этом резко возрастут затраты на диагностирование.

Для определения оптимальных значений l_d и S_y разработана номограмма для определения упреждающих значений диагностических параметров и межконтрольных пробегов, полученная путем решения с помощью ЭВМ уравнения (6) в широком диапазоне изменения входящих в него величин после их нормирования. Для определения с помощью номограммы оптимальной l_d необходимо знать затраты на диагностирование c_d , предупредительный ремонт d и устранение отказа c , средний ресурс \bar{l} , предельное S_{np} , значение диагностического параметра, коэффициент вариации ресурса, показатель функции наработки α .

Для того чтобы воспользоваться номограммой, пронормируем приведенные данные:

$$K = c/d; B^0 = c_d/d; l^0 = \bar{l}/l_d.$$

Здесь K – нормированная в долях d величина затрат на устранение пропущенного отказа; B^0 – нормированная стоимость диагностирования; l^0 – нормированная величина средней наработки диагностируемого механизма до достижения диагностическим параметром предельного значения. Переходя от нормированных величин к абсолютным, находят оптимальное значение S_y из произведения $S_y^0 S_r$. Если расхождение между l_d и l_p значительное, то корректировка возможна с помощью той же номограммы. Для этого, вычислив нормированное значение l^0 , находят для него оптимальное (скорректированное) значение S_y .

При эксплуатации составных частей космического комплекса, кроме дискретных затрат c и d , обусловленных стоимостью запасных частей и простоев при ремонте и диагностировании, имеют место и непрерывные затраты, которые, не вызывая отказа, снижают экономичность и эффективность работы всего комплекса. В этих случаях в формуле (6) величины c и d соответственно увеличиваются на составляющие непрерывных затрат, связанных с отказом $G_{от}$ и предупредительным обслуживанием (G_n). При этом уравнение (6) принимает вид [10, 11]

$$C(l_d, S_y) = \min \left\{ \frac{(c + G_{от})Q(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{(d + G_n)[1 - Q(l_d, S_y)]}{l_\phi(l_d, S_y)} + \frac{c_d k(l_d, S_y)}{l_\phi(l_d, S_y)} \right\}. \quad (7)$$

Экономико-вероятностный метод определения l_A при дискретных значениях диагностического параметра

Экономико-вероятностный метод определения l_d при дискретных значениях диагностического параметра (см. рис. 1, 2) применяется в тех случаях, когда используемый диагностический параметр и диагностические средства обеспечивают выявление неисправностей объекта диагностирования в данный момент, но не позволяют установить общую закономерность изменения его технического состояния в течение межконтрольного периода. Такое положение создается при значительном рассеивании процессов изменения технического состояния космического комплекса, что весьма характерно для изделий КК.

Использование дискретных диагностических параметров, с одной стороны, снижает точность прогноза, но, с другой – делает процесс выявления неисправностей более простым и технологичным.

Здесь целесообразно проводить оптимизацию l_d по минимуму суммарных эксплуатационных потерь Π , до восстановления. Эти потери определяются стоимостью всех диагностических прове-

рок до замены, а также дополнительными затратами на несвоевременное обнаружение неисправности. С уменьшением периодичности l_d первая составляющая, очевидно, возрастает за счет увеличения числа проверок; в то же время вторая составляющая и вероятность аварийных ремонтов уменьшаются. Можно показать, что математическое ожидание суммарных потерь (в предположении $l_d \ll \bar{l}$)

$$M(\Pi_3) = c_d (\bar{l} / l_d + 0,5) + c' l_d / 2,$$

где c' – дополнительные удельные затраты при несвоевременном обнаружении неисправности. Из условия $\min \Pi_3$ находим оптимальную периодичность [12]

$$l_d^{opt} = \sqrt{2c_d \bar{l} / c'}. \tag{8}$$

Удельные затраты c' определяются из следующих соображений. При планово-предупредительной системе ТО, когда средний фактический период эксплуатации КК диагностируемого составляет $l_\phi < \bar{l}$, затраты на ТО близки к затратам d на предупредительный ремонт. При системе обслуживания по потребности, когда время эксплуатации равно среднему ресурсу \bar{l} КС, эти затраты будут равны затратам c на восстановление пропущенного отказа. Поэтому разность между c и d , отнесенная к разности между соответствующими пробегами \bar{l} и l_ϕ , будет представлять собой удельные затраты c' , т.е.

$$c' = \frac{c-d}{\bar{l}-l_\phi} = \frac{d(k-l)}{\bar{l}(1-l_\phi/\bar{l})}, \tag{9}$$

где c – стоимость восстановления пропущенного отказа; d – стоимость предупредительного обслуживания; k – коэффициент, выражающий затраты на ремонт из-за пропущенного отказа в долях затрат на предупредительный ремонт; l_ϕ – средний фактический ресурс диагностируемого космического аппарата до ремонта или обслуживания, который определяется [13, 14] выражением

$$l_\phi = l_p P + \int_0^{l_p} l f(l) dl, \tag{10}$$

где l_p – регламентное время между плановыми обслуживаниями; P – вероятность безотказной работы за межремонтную эксплуатацию; $f(l)$ – плотность распределения ресурса до первого отказа.

После соответствующих преобразования получим

$$l_d^{opt} = A \bar{l} \sqrt{2c_d / (c-d)},$$

где A – коэффициент, зависящий от вида функции $f(l)$ и, в первую очередь, от ее коэффициента вариации v . Переходим к нормированным величинам

$$\mu^{opt} = l_d^{opt} / \bar{l}; k = c / d; \varepsilon = c_d / d, \mu^{opt} = A(v) \sqrt{2\varepsilon / (k-1)}. \tag{11}$$

Так как удельные затраты при системе ТО с плановым диагностированием не должны превышать удельные затраты при планово-предупредительной системе без диагностирования, то необходимо выполнение условия

$$\frac{d + M(\Pi_3)}{\bar{l}} \leq \frac{dP + c(1-P)}{l_\phi}. \tag{12}$$

Отсюда можно найти предельное значение коэффициента стоимости диагностирования $\varepsilon^{opt}(k, v)$, при котором ее внедрение экономически целесообразно. Представляя это значение в уравнение (11), получим окончательно некоторую сложную зависимость, которая представлена в виде номограммы (рис. 2), позволяющей определить оптимальную периодичность диагностирования по

среднему ресурсу \bar{T} диагностируемого механизма, рассеиванию его долговечности (коэффициенту вариации v) и соотношению между затратами на вынужденный и предупредительный ремонты [15].

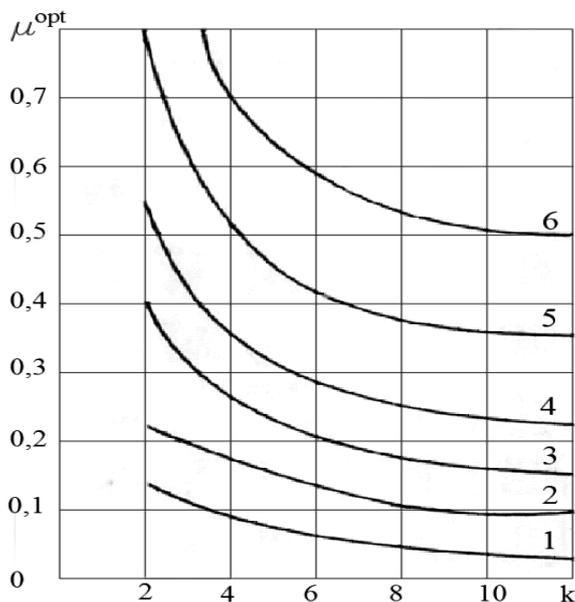


Рис. 2. Номограмма определения оптимальной периодичности μ^{opt} диагностирования при различных коэффициентах вариации v :
 1 – $v = 0,2$; 2 – $v = 0,3$; 3 – $v = 0,4$; 4 – $v = 0,5$; 5 – $v = 0,6$; 6 – $v = 0,7$

Пользуясь описанной методикой и соответствующими статистическими данными показателей надежности КК, можно определить оптимальные периодичности их диагностирования и составить рациональный технологический процесс ТО, обеспечивающий минимум текущего ремонта.

Дальнейшее совершенствование методик прогнозирования исправной работы КК возможно на основе оперативной корректировки диагностических нормативов, а также путем применения переменной периодичности диагностирования в зависимости от наработки и технического состояния диагностируемого реактора. Для этого необходимы автоматизированные диагностические комплексы, входящие в АСУ и позволяющие оперативно управлять режимами технического обслуживания.

Постановка диагноза

Постановка диагноза, т.е. заключение о техническом состоянии диагностируемого реактора, имеет цель определить его пригодность к эксплуатации в настоящее время и в будущем за время эксплуатации до очередного обслуживания.

Из этого следует, что при плановом диагностировании постановка диагноза содержит элементы прогнозирования ресурса исправной работы КК.

Для уменьшения эксплуатационных затрат применяют два вида диагноза, различающиеся по глубине: общий и поэлементный. Диагноз работоспособности агрегата, системы, реактора в целом называют общим, а детальный диагноз, определяющий причины снижения работоспособности, – поэлементным. Как общий, так и поэлементный диагноз используют для управления технологическими процессами и качеством обслуживания реактора. По результатам общего диагноза КА подвергают поэлементному диагностированию или направляют в эксплуатацию, а по результатам поэлементного производят ремонт или обслуживание. Кроме того, заключительный диагноз используют для контроля качества ТО и ремонта КА. Постановка диагноза состояния относительно простых механизмов, когда приходится пользоваться одним диагностическим параметром, не встречает особых методических затруднений [16, 17].

Она практически сводится к измерению величины диагностического параметра S , по сравнению ее с нормативом.

При этом для механизмов с известной непрерывной (возрастающей) закономерностью изменения технического состояния возможно три варианта диагноза: $S > S_n$; $S_y < S < S_n$; $S < S_y$. В первом варианте необходим ремонт с целью устранения неисправности, во втором требуется предупредительное техническое обслуживание ввиду недостаточного ресурса, а в третьем – восстановительное воздействие не требуется до следующего планового диагностирования. Для КА, диагностируемых с помощью дискретных диагностических параметров, когда прослеживание индивидуального изменения реализаций технического состояния нецелесообразно, возможны только два варианта диагноза: исправен и неисправен, т.е. $S > S_n$; $S < S_n$. В первом варианте требуется техническое обслуживание, а во втором не требуется – объект исправен. При этом безотказность работы в предстоящем полете гарантируется заблаговременным ужесточением диагностического норматива S_n .

Постановка поэлементного диагноза сложных КС, когда приходится пользоваться несколькими диагностическими параметрами, существенно осложняется. Дело в том, что каждый диагностический параметр может быть связан с рядом структурных. Поэтому определенная величина каждого из них может свидетельствовать о той или иной неисправности объекта диагностирования. Значит, если число используемых диагностических параметров n , то возможное число технических состояний диагностируемого механизма составит 2^n . Теоретически постановка диагноза сводится к тому, чтобы из множества возможных состояний диагностируемого блока выделить одно, наиболее вероятное. Поэтому задачей диагноза по многим диагностическим параметрам является раскрытие множественных связей между структурными параметрами X_1, X_2, \dots, X_n и соответствующими диагностическими параметрами S_1, S_2, \dots, S_m . Для этой цели в практике диагностирования составных частей КА наиболее часто применяют диагностические матрицы. Диагностическая матрица (табл. 1) представляет собой двужначную логическую модель, описывающую связи между структурными и диагностическими параметрами, достигшими допустимой величины. Горизонтальные ряды матрицы соответствуют применяемым диагностическим параметрам. При достижении диагностическим параметром нормативной величины возможна одна или несколько неисправностей объекта диагностирования. Вертикальные ряды соответствуют неисправностям объекта, т.е. его структурным параметрам, достигшим допустимой величины. Единица в месте пересечения горизонтального и вертикального рядов означает возможность существования неисправности. Нулем обозначено отсутствие такой возможности [18].

Таблица 1

Матричная модель связей между диагностическими и структурными параметрами

Нормативные величины		Структурных параметров (неисправностей)				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Диагностических параметров	S_1	0	0	1	0	0
	S_2	1	1	0	1	1
	S_3	0	0	0	0	1
	S_4	0	1	1	0	1
	S_5	0	1	0	0	0

При составлении матрицы стремятся применять минимальное число диагностических параметров.

Для этого используют только наиболее чувствительные и информативные параметры. В то же время число диагностических параметров должно быть достаточным для получения достоверного однозначного диагноза.

Аналитическую связь между структурными и диагностическими параметрами можно записать в общем виде следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= f_1(S_1, S_2, \dots, S_m); \\ X_2 &= f_2(S_1, S_2, \dots, S_m); \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ X_n &= f_n(S_1, S_2, \dots, S_m). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Здесь система из n уравнений (где n – число структурных параметров X , каждый из которых может быть связан с m измеряемых диагностических параметров) описывает все возможные состояния объекта диагностирования, выраженные диагностическими параметрами S . Для практического составления этих уравнений необходимо знать перечень характерных неисправностей реактора, подлежащих выявлению, и структурно-следственную схему соответствующего диагностируемого механизма. Перечень характерных неисправностей механизма составляют на основе статистических показателей его надежности. Пользуясь подобной схемой, составленной на основе инженерного изучения объекта диагностирования, можно применительно к данному перечню неисправностей установить первоначальный перечень диагностических параметров и связи между теми и другими. Однако составленные таким образом логические уравнения, каждое из которых представляет горизонтальную строку матрицы, могут оказаться недостаточно информативными, поскольку структурно-следственные схемы не содержат количественной оценки диагностических параметров. Для того чтобы оценить значимость диагностических параметров, следует проанализировать их качества: чувствительность, информативность по вероятностям их возникновения при наличии данной неисправности или по вероятностным связям с основными параметрами работоспособности объекта диагностирования. При относительно малых вероятностях параметр считается малозначачим и приравнивается нулю. В противном случае он приравнивается единице. Подобранные таким образом диагностические параметры позволяют заполнять нулями и единицами соответствующие клетки матрицы. Подобная матрица дает возможность решить задачу локализации неисправности диагностируемого механизма по наличию соответствующего комплекса диагностических параметров, достигших нормативной величины. Физическая сущность решения данной задачи заключается в исключении неисправностей, несовместимых с существованием определенной комбинации измеренных диагностических параметров. Процесс выявления неисправности можно рассматривать как снижение энтропии (степени неопределенности технического состояния диагностируемого механизма) путем последовательного введения в диагностическую матрицу доз информации, несомой диагностическими параметрами, достигшими нормативной величины.

Для практической постановки диагноза матрицу выполняют в виде электронного прибора, к которому подводятся электрические сигналы, соответствующие измеряемым диагностическим параметрам. При достаточной силе эти сигналы проходят через пороговое устройство (триггер) в свою электрическую цепь. По цепи сигнал направляется в элемент совпадения контрольной лампы x_1, x_2 и т.д., соответствующей той неисправности, при которой возможно существование данного диагностического параметра. Если лампа не загорится, то это будет означать, что доза информации, полученная от данного диагностического параметра, недостаточна для локализации имеющейся неисправности и что для постановки диагноза требуется ввод дополнительной информации от других диагностических параметров. Так, например, сигнал неисправности x_1 поступит только после ввода сигналов от двух параметров S_2 и S_4 , сигнал неисправности x_2 – после ввода S_1 и S_3 и т.д. Следовательно, алгоритм функционирования данного логического устройства: $x_1 = S_2 S_4$; $x_2 = S_1 S_3$; $x_3 = S_1 S_2 S_4$; $x_4 = S_2 S_3$; $x_5 = S_1 S_3 S_4$. Подобные устройства позволяют локализовать неисправности и выводить информацию по соответствующим каналам в центральный пункт управления или на табло оператора. При необходимости ввода скорректированных диагностических показателей производится регулировка пороговых устройств. Наличие переключателей позволяет перестраивать диагностическую матрицу на другие диагностические параметры. Логическая матрица указанного вида может быть основой синтеза логических автоматов для определения технического состояния объекта диагностирования путем автоматической локализации неисправностей. В случаях когда локализация неисправностей при помощи диагностической матрицы затруднительна, например, из-за небольшого числа измеряемых диагностических параметров и сильного пересечения классов состояния, для постановки диагноза могут быть использованы теория и технические средства распознавания образов. Совокупности реализаций диагностических параметров для любого механизма (т.е. их величин, зафиксированных в какой-либо системе координат) представляют собой некоторые множества, обладающие характерными свойствами. Эти свойства проявляются в том, что ознакомление людей или машины (распознающего устройства) с реализациями указанных множеств дает возможность в дальнейшем распознавать принадлежность данной реализации к какому-либо из этих множеств. Множества такого типа называют образами. Совокупности различных технических состояний объекта диагностирования обозначают в том случае так называемым «алфавитом» неисправностей: $A = A_0, A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_M$, где A_0 – состояние технически исправного объекта;

A_i – класс состояния объекта, выраженный совокупностью реализаций конкретной неисправности; M – число классов возможных состояний объекта. Задача распознавания неисправностей заключается в отнесении полученной при диагностировании реализации диагностического параметра, выражающего состояние диагностируемого механизма, к соответствующему классу A_i . При этом к одному классу относятся реализации, обладающие общими свойствами. Если измерить диагностические параметры нескольких одинаковых, исправных механизмов, то реализации параметров, полученные при диагностировании, образуют соответствующую область. При этом они будут группироваться относительно некоторого центра распределения, называемого эталоном A_0 (рис. 3 и 4). Возникновение в этих же механизмах какой-либо определенной неисправности вызовет смещение области реализации и ее эталона A_{i_3} в другое место. Наличие другой неисправности снова изменит местоположение области реализаций диагностических параметров и эталона A_{i_2} , и т.д. Если местоположение областей характерных неисправностей механизма известно, можно определить неизвестную неисправность, зная реализацию, полученную при диагностировании, по ее соответствию, принадлежности к тому или иному классу состояний объекта диагностирования [19].

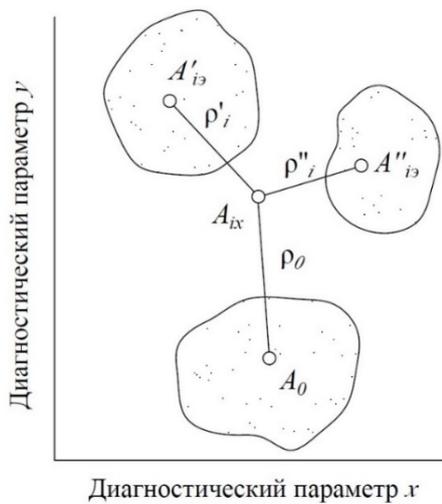


Рис. 3. Схема распознавания образов по расстоянию ρ между измеренной реализацией A_{ix} , эталоном неисправностей A'_{i_3} , A''_{i_3} и эталоном исправного состояния объекта A_0

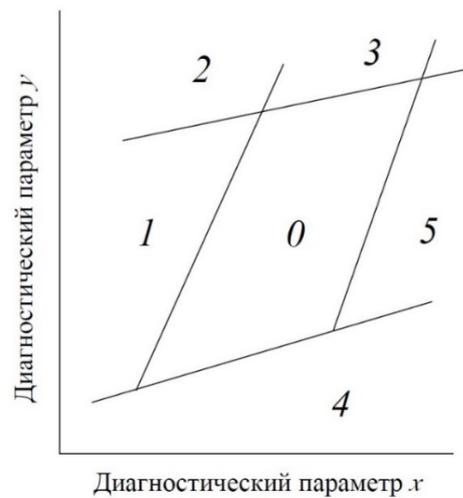


Рис. 4. Схема распознавания образов по включению измеренной реализации A_{ix} в области исправных состояний 0 или соответствующих неисправных состояний 1, 2, 3, 4, 5

Следовательно, распознавание технического состояния данного механизма можно понимать как установление того факта, что образ A_{ix} похож на эталонный образ A_{i_3} , считая, что степень схожести определяется расстоянием между реализацией A_{ix} и эталоном A_{i_3} . Возможны два способа распознавания неисправностей: по включению полученной реализации (образа) внутрь области неисправных состояний и по расстоянию между его центром распределения A_{ix} и эталоном A_{i_3} . В первом случае материал, на котором формируют получение эталонов (он называется обучающей последовательностью), выражается границами между областями характерных неисправностей (рис. 3). Во втором случае распознавание сводится к определению расстояния между A_{ix} и A_{i_3} :

$$\rho(A_{ix}, A_{i_3}) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_{kx} - X_{k_3})^2}, \tag{14}$$

где X_{kx} и X_{k_3} – значения диагностических параметров (реализаций), предъявленных к распознаванию; N – число диагностических параметров, характеризующих алфавит неисправностей.

Представив величины диагностических параметров, например, в координатах y – время износа, x – перемещение КА (см. рис. 4), можно получить область исправных состояний, аналогичную

области 0, и области 1–5 характерных неисправностей КА (увеличение зазора и т.д.). Подобные неисправности можно выявлять с помощью относительно недорогих электронных приборов.

Описанный метод применения теории распознавания образов для диагностирования реакторов может быть использован и для других механизмов. Он позволяет определять техническое состояние КК непосредственно в процессе эксплуатации.

Общий процесс диагностирования

Постановка диагноза состоит в сравнении полученного одного или нескольких прошедших обработку диагностических параметров с заданными нормативами. В простейшем случае при использовании единичного диагностического параметра процедура диагностирования на этом заканчивается. Превышение S_y означает потребность в техническом воздействии установленного объема, а отсутствие превышения – возможность эксплуатации до очередного контроля.

При использовании для диагноза большого числа параметров применяют методы синтеза и анализа обработки снятой информации. Процесс диагностирования путем синтеза дифференцированной информации, полученной с помощью нескольких датчиков, и путем анализа обобщенной информации, зафиксированной одним датчиков, показан на принципиальной схеме (рис. 5).

Сущность процесса диагностирования сложного объекта путем синтеза дифференцированной информации заключается в следующем. Диагностируемый механизм, как правило, подвергается тестовому воздействию. При этом датчики D_1, D_2, \dots, D_n фиксируют величины структурных параметров X_1, X_2, \dots, X_n каждого из элементов объекта $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$. Значения структурных параметров, выраженные электрическими сигналами S_1, S_2, \dots, S_n , поступают в блок усиления и после обработки в пороговое устройство. Последнее пропускает сигналы, превышающие допустимые значения S_y . Эти сигналы $S''_1, S''_2, \dots, S''_m$ поступают в логическое устройство (диагностическую матрицу). Матрица синтезирует информацию, полученную от нескольких датчиков, и выдает диагноз. Диагноз может быть уточнен путем дифференцирования потребного воздействия на конкретные виды: предупредительное или ремонт [20].

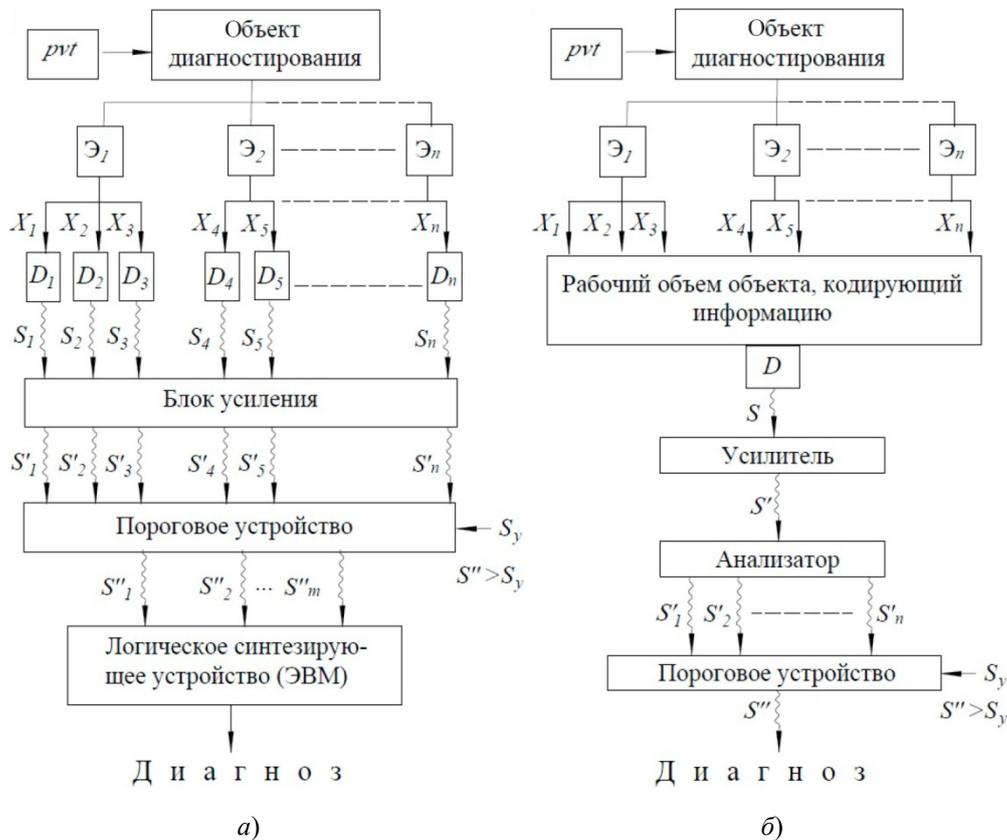


Рис. 5. Процесс диагностирования технического состояния сложного объекта с использованием различных методов получения и обработки информации: а – метод синтеза; б – метод анализа

Процесс диагностирования путем анализа обобщенной информации отличается от описанного тем, что изменение структурных параметров X_1, X_2, \dots, X_n группы элементов объекта фиксируют интегрально с помощью одного датчика (например, пьезодатчика параметров вибрации). После усиления сигнал, заключающий в себе обобщенную информацию о техническом состоянии объекта, необходимо анализировать, выделяя наиболее характерные и полезные составляющие. Затем эти составляющие фильтруют по величине с помощью порогового устройства и ставят диагноз. При диагностировании несложных объектов описанный процесс упрощают путем исключения отдельных этапов.

Диагностирование сложных механизмов часто требует автоматизации. При этом предписанная последовательность определяется соответствующим алгоритмом. Алгоритм диагностирования определяет: выведение объекта (КА, агрегата) на тестовый режим; обработку сигнала, т.е. постановку первоначального диагноза (оценку работоспособности); при необходимости осуществляют углубленный поиск неисправности (поэлементная диагностика), переход к следующему элементу объекта. Таким образом, алгоритм диагностирования состоит из синтеза алгоритмов определения работоспособности и поиска неисправностей. Вертикальная ветвь этого алгоритма представляет систему последовательного поиска основного алгоритма. Возможны два исхода: положительный, если выходной параметр не превышает нормы (на рис. 5 «Да»), и отрицательный «Нет». В первом случае осуществляют очередной шаг (по стрелке вниз), во втором – начинают поиск неисправности по особому алгоритму (боковые ветви). Алгоритм работоспособности и алгоритм неисправностей строятся с учетом особенностей объекта, информативности очередного диагностического параметра, технологичности процесса, информационного и экономического критерия. Экономический критерий:

$$\bar{c} = \sum_i^n c_i P_i,$$

где \bar{c} – средняя стоимость проверки; c_i – результирующая стоимость проверки для нахождения отказавшего i -го элемента; P_i – вероятность того, что отказ обусловлен i -м элементом.

Если данные о вероятностях отказов отсутствуют, то можно использовать критерий минимакса. При этом оптимальным считается алгоритм, при котором максимальная стоимость поиска отказавшего элемента является наименьшей по сравнению с другими вариантами. Подобные алгоритмы закладываются также в основу технологических процессов диагностирования КС и диагностических матриц (таблиц).

Заключение

Одним из основных факторов, обеспечивающих высокий уровень технического состояния космических комплексов, космических аппаратов, средств выведения и других изделий ракетно-космической техники является наличие развитой нормативной базы, которая устанавливает единый подход к порядку их создания, производству и эксплуатации, который основан на последних достижениях науки и техники. К одному из важнейших элементов данной нормативной базы относится комплекс нормативных документов, устанавливающих требования к обеспечению необходимого уровня технического состояния. В силу сложившейся за десятилетия практики создания, производства и эксплуатации изделий РКТ решение вопросов обеспечения высокого уровня технического состояния изделий РКТ всегда являлось первоочередной задачей. Подобный подход позволил создать комплекс нормативных документов высокого научно-технического уровня, сформировать достаточно эффективно действующие организационные структуры, внедрить в организациях ракетно-космической промышленности высокую культуру безопасности.

Показателем эффективности данных работ явилось то, что, несмотря на имевший место ряд аварий, включая аварии, связанные с потерей ракет-носителей и полезной нагрузки, значительными финансовыми потерями при этом, удалось избежать масштабных негативных последствий, связанных с нанесением вреда персоналу, населению и окружающей среде.

Цели и задачи обеспечения высокого уровня технического состояния космических комплексов, космических аппаратов, средств выведения и других изделий ракетно-космической техники определяются долгосрочными целями и задачами космической деятельности России и направлены на достижение этих целей и на сохранение статуса России как космической державы и лидера на

мировом космическом рынке. АС является объектом повышенной опасности: ввиду этого все оборудование, используемое во время эксплуатации, подвергается различного рода восстановительным мероприятиям (методологическое обеспечение, профилактика, контроль исправности). Как следствие этого, к концу срока эксплуатации оно находится, как правило, во вполне работоспособном состоянии. Тогда встает вопрос о возможном продлении срока эксплуатации. Если такое решение обоснованно, то это дает большие экономические выгоды. Исключительно важную роль играет анализ надежности оборудования с учетом старения, на основании которого можно делать выводы о продлении срока эксплуатации. На данный момент большинство методов учета старения основаны на исследовании поведения интенсивности отказов, описываемых функциями, возрастающими во времени. Среди совокупности мероприятий, обеспечивающих поддержание работоспособности систем АС на высоком уровне, одно из ведущих мест занимают вопросы методологического обеспечения. Техническое обслуживание связано с анализом состояния системы и проведением, в случае необходимости, комплекса восстановительных работ. Под восстановительными мероприятиями понимается некоторое воздействие на систему, целью которого является либо определение состояния системы и ликвидация отказа, либо улучшение характеристик безотказности. Можно предложить несколько алгоритмов для определения программы эксплуатации системы, которые делятся на три основные группы. Так, например, эксплуатация системы по заданному ресурсу. Применяется для элементов системы стареющего типа, у которых интенсивность отказов является возрастающей во времени функцией. Для этой методики существует ряд стратегий, в которых предусмотрено полное восстановление системы. Эксплуатация систем по состоянию основана на периодическом измерении некоторых параметров системы, которые изменяются в результате действия внешних факторов и старения. На основании наблюдений принимается решение о проведении того или иного вида работ по обслуживанию системы, т.е. организация обслуживания осуществляется в зависимости от фактического состояния системы.

Библиографический список

1. Павлов, И. В. Статистические методы оценки надежности сложных систем / И. В. Павлов. – Москва : Радиосвязь, 1982. – 168 с.
2. Сидняев, Н. И. Теория вероятностей и математическая статистика // Н. И. Сидняев. – Москва : Юрайт, 2011. – 310 с.
3. Геча, В. Я. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке / В. Я. Геча, Р. Н. Барбул, Н. И. Сидняев, Ю. И. Бутенко // Надежность. – 2019. – № 2. – С. 3–8.
4. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965. – 524 с.
5. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учеб. пособие / Н. И. Сидняев. – Москва : Юрайт, 2011. – 399 с.
6. Морозов, Д. В. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре / Д. В. Морозов, С. Ф. Чермошенцев // Надежность. – 2019. – № 19 (1). – С. 30–35.
7. Сидняев, Н. И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Н. И. Сидняев, Г. С. Садыхов, В. П. Савченко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 382 с.
8. Morris, S. F. Use and application of MIL-HDBK-217 / S. F. Morris // Solid Slate Technology. – 1990. – Vol. 33, № 6. – P. 65–69.
9. Сидняев, Н. И. Математическое моделирование оценки надежности объектов сложных технических систем / Н. И. Сидняев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 4. – С. 24–31.
10. Brennom, T. R. Should us MIL-HDBK-217 be 8888 / T. R. Brennom // IEEE Trans. Reliab. – 1988. – Vol. 37, № 5. – P. 474–475.
11. Сидняев, Н. И. Обзор и исследование физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных РЛС / Н. И. Сидняев // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6, № 2 (23). – С. 4–52.
12. Барлоу, Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – Москва : Советское радио, 1969. – 488 с.
13. РД 50–690–89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – Введ. 1991–01–01. – Москва : Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.
14. Сидняев, Н. И. Факторы космической погоды, влияющие на бортовые элементы низкоорбитальных космических аппаратов / Н. И. Сидняев, Л. А. Макриденко, В. Я. Геча, В. Н. Онуфриев // Вопросы электро-

- механики : тр. Четвертой Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 90–100.
15. Похабов, Ю. П. Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов / Ю. П. Похабов // Надежность. – 2018. – № 4. – С. 28–35.
 16. Антонов, С. Г. Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий / С. Г. Антонов, С. М. Климов // Надежность. – 2017. – № 17 (1). – С. 32–39.
 17. Сидняев, Н. И. О современных подходах развития теории эффективности космических систем / Н. И. Сидняев, В. Я. Геча, Р. Н. Барбул / Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Москва, 18 апреля 2018 г.). – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – С. 69–75.
 18. Климов, С. М. Методика повышения отказоустойчивости сетей спутниковой связи в условиях информационно-технических воздействий / С. М. Климов, С. В. Поликарпов, А. В. Федченко // Надежность. – 2017. – № 17 (3). – С. 32–40.
 19. Колобов, А. Ю. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов / А. Ю. Колобов, Е. В. Дикун // Надежность. – 2017. – № 17 (4). – С. 31–35.
 20. Сидняев, Н. И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Н. И. Сидняев, Г. С. Садыхов, В. П. Савченко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 382 с.

References

1. Pavlov I. V. *Statisticheskie metody otsenki nadezhnosti slozhnykh sistem* [Statistical methods for evaluating the reliability of complex systems]. Moscow: Radiosvyaz', 1982, 168 p. [In Russian]
2. Sidnyaev N. I. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Yurayt, 2011, 310 p. [In Russian]
3. Gecha V. Ya., Barbul R. N., Sidnyaev N. I., Butenko Yu. I. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2019, no. 2, pp. 3–8. [In Russian]
4. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in reliability theory]. Moscow: Nauka, 1965, 524 p. [In Russian]
5. Sidnyaev N. I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh: ucheb. posobie* [Theory of experiment planning and analysis of statistical data: textbook]. Moscow: Yurayt, 2011, 399 p. [In Russian]
6. Morozov D. B., Chermoshentsev S. F. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2019, no. 19 (1), pp. 30–35. [In Russian]
7. Sidnyaev N. I., Sadykhov G. S., Savchenko V. P. *Modeli i metody otsenki ostatochnogo resursa izdeliy radioelektroniki* [Models and methods for estimating the remaining life of radio electronics products]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2015, 382 p. [In Russian]
8. Morris S. F. *Solid Slate Technology*. 1990, vol. 33, no. 6, pp. 65–69.
9. Sidnyaev N. I. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2003, no. 4, pp. 24–31. [In Russian]
10. Brennom T. R. *IEEE Trans. Reliab.* 1988, vol. 37, no. 5, pp. 474–475.
11. Sidnyaev N. I. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya* [Physical fundamentals of instrumentation]. 2017, vol. 6, no. 2 (23), pp. 4–52. [In Russian]
12. Barlou R., Proshan F. *Matematicheskaya teoriya nadezhnosti* [Mathematical theory of reliability]. Moscow: Sovetskoe radio, 1969, 488 p. [In Russian]
13. RD 50–690–89. *Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metody otsenki pokazateley nadezhnosti po eksperimental'nym dannym* [RD 50-690-89. Methodical instructions. Reliability in technology. Methods for evaluating reliability indicators based on experimental data]. Vved. 1991–01–01. Moscow: Gos. komitet SSSR po upravleniyu kachestvom produktsii i standartam, 1990. [In Russian]
14. Sidnyaev N. I., Makridenko L. A., Gecha V. Ya., Onufriev V. N. *Voprosy elektromekhaniki: tr. Chetvertoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli»* [Issues of electrical engineering : proc. The Fourth Intern. scientific-technical Conf. "Actual problems of creating space systems for remote sensing of the Earth"]. Moscow: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016, pp. 90–100. [In Russian]
15. Pokhabov Yu. P. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2018, no. 4, pp. 28–35. [In Russian]
16. Antonov S. G., Klimov S. M. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2017, no. 17 (1), pp. 32–39. [In Russian]
17. Sidnyaev N. I., Gecha V. Ya., Barbul R. N. *Sistemy upravleniya polnym zhiznennym tsiklom vysokotekhnologichnoy produktsii v mashinostroenii: novye istochniki rosta: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Moskva, 18 aprelya 2018 g.)* [Systems for managing the full life cycle of high-tech products in mechanical engineering: new sources of growth: materials vseros. scientific-practical Conf. (Moscow, April 18, 2018)]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2018, pp. 69–75. [In Russian]

18. Klimov S. M., Polikarpov S. V., Fedchenko A. V. *Nadezhnost'* [Reliability 2017, no. 17 (3), pp. 32–40. [In Russian]
19. Kolobov A. Yu., Dikun E. V. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2017, no. 17 (4), pp. 31–35. [In Russian]
20. Sidnyaev N. I., Sadykhov G. S., Savchenko V. P. *Modeli i metody otsenki ostatochnogo resursa izdeliy radioelektroniki* [Models and methods for estimating the remaining life of radio electronics products]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2015, 382 p. [In Russian]

Сидняев Николай Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой высшей математики,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5)
E-mail: Sidn_ni@mail.ru

Sidnyaev Nikolay Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of higher mathematics,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Уракова Карина Айратовна

магистрант,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5)
E-mail: urakovakarina13@gmail.com

Urakova Karina Ayratovna

master degree student,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Сидняев, Н. И. Метод определения периодичности диагностирования космических систем по допустимому уровню вероятности безотказной работы / Н. И. Сидняев, К. А. Уракова // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 47–67. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-7.

А. В. Маслобоев, В. Н. Цыгичко

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ И КОНФИГУРИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

A. V. Masloboev, V. N. Tsygichko

INFORMATION STRUCTURE ANALYSIS AND CONFIGURATION OF DECISION SUPPORT SYSTEM OF REGIONAL SITUATIONAL CENTERS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследование направлено на разработку методов и средств повышения эффективности управленческой деятельности в региональных ситуационных центрах для обеспечения безопасности функционирования и развития социально-экономических систем. *Материалы и методы.* На основе совместного применения энтропийных моделей и качественных методов оценки эффективности программно-технических средств автоматизации управления предложен комплексный подход к выбору и оценке качества конфигурации систем поддержки принятия решений ситуационных центров региона. Применение подхода позволяет определить состав и структуру систем поддержки принятия решений ситуационных центров с точки зрения обеспечения полноты ситуационной осведомленности на всех уровнях управления и с учетом функциональных и нормативных требований к режимам ситуационного управления. *Результаты и выводы.* В ходе исследования проведен анализ информационной структуры управления безопасностью в ситуационных центрах. Построена и исследована структурная модель процесса принятия решений и рассмотрены реализующие ее процедуры. На основе этого предложены критерии оценки эффективности и постановка задачи выбора конфигурации систем информационной поддержки управления по этим критериям. Приложение разработок показано на примере ситуационного центра Мурманской области.

Ключевые слова: энтропийный подход, оценка эффективности, система поддержки принятия решений, модель, ситуационный центр, управление, региональная безопасность.

Abstract. *Background.* The research is aimed at methods and tools engineering for management activity efficiency enhancement of regional situational centers in the context of security support of socio-economic system functioning and development. *Materials and methods.* On the basis of joint use of entropy-based models and qualitative methods for efficiency assessment of management automation soft/hardware tools a comprehensive approach to configuration choice and quality estimation of decision support system of regional situational centers is proposed. Approach application allows determining composition and structure of decision support system of situational centers in respect to completeness support of situational awareness at the all management levels and subject to functional and legal requirements defined to situational control modes. Information structure analysis of security management in the situational centers is carried out. *Results and conclusions.* Structural model of decision-making process is designed and analyzed. Implementation of model phases is considered. On the basis of that efficiency estimation criterion and problem statement of configuration rational choice of the management information support system based on appropriate criterion are proposed. Results application is represented by the example of situational center of Murmansk region.

Keywords: entropy-based approach, efficiency estimation, decision support system, model, situational center, control, regional security.

Введение

На сегодняшний день одним из центральных элементов цифровой экономики и системы государственного управления становятся ситуационные центры (СЦ). Особенно остро потребности органов государственной власти в современных СЦ наблюдаются на региональном уровне для повышения эффективности управления устойчивым социально-экономическим развитием территорий и

для решения задач обеспечения региональной безопасности. В связи с этим в стране активно развивается система распределенных СЦ, а в регионах создаются новые СЦ различного уровня и назначения. При этом для широкого и эффективного использования СЦ в системе государственного управления необходимо решить комплекс научно-технических задач, связанных с информационно-аналитической поддержкой процессов выработки и реализации управленческих решений в СЦ. Решение этих задач на практике зачастую осложняется необходимостью системной интеграции СЦ с корпоративными и ведомственными информационными системами, а также растущими требованиями к средствам оперативной аналитической обработки больших объемов разноплановой информации о различных аспектах развития социально-экономических систем для целенаправленного управления ими. Поскольку эффективность управления определяется качеством процесса принятия управленческих решений, требуется создание и внедрение новых технологий и систем поддержки принятия решений (СППР) в работу СЦ, основанных на методах искусственного интеллекта, концепции Интернета вещей (IoT), принципах сетецентрического управления и «умных» киберфизических систем.

Структура и состав СППР во многом определяют эффективность работы любого СЦ на всех уровнях иерархии управления – оперативном, тактическом, стратегическом. Выбор и синтез конфигурации СППР СЦ, обеспечивающей требуемый с точки зрения временных и стоимостных затрат уровень эффективности управления, является важной задачей, которую необходимо решать как при создании новых СЦ, так и при совершенствовании существующих СЦ. Это, в свою очередь, предопределяет необходимость теоретического осмысления и развития подходов к оценке качества структурно-функционального состава СППР СЦ для целей повышения эффективности управленческой деятельности, а также минимизации стоимости и рисков последствий принимаемых решений. На решение этих задач направлено настоящее исследование. Так как принятие управленческих решений в СЦ практически всегда происходит в условиях неопределенности, СППР СЦ должна адаптироваться к динамически меняющейся внешней среде. Это позволяет рассматривать и исследовать конфигурирование СППР СЦ в классе систем с переменной структурой.

Основные понятия и определения

Под СЦ согласно статье [1] понимается совокупность программно-аппаратных средств, информационных ресурсов и сервисов, а также обслуживающего персонала, реализующих оперативный информационный мониторинг обстановки в регионе в режиме, максимально приближенном к режиму реального времени, ситуационный анализ, выбор и активацию алгоритмов ситуационного управления и обеспечивающих тем самым информационно-аналитическую поддержку принятия управленческих решений и стратегического планирования.

Общепринятого определения СППР на сегодняшний день пока не предложено. Это связано с тем, что структура и функции СППР существенно зависят от вида решаемых задач, категории пользователей и доступной информации для генерации и принятия решений. В общем случае [2] СППР определяется как класс автоматизированных информационных систем, предоставляющих субъектам управления различного уровня (лицам, принимающим решения) инструментальные средства интеграции и аналитической обработки информации и экспертных знаний, компьютерного моделирования и визуализации, обеспечивающих помощь в решении сложных многокритериальных слабоструктурированных задач в разных сферах деятельности, а также в поиске, выборе и принятии обоснованных управленческих решений в условиях неопределенности и неполноты информации о состоянии управляемых объектов и внешней среды.

Конфигурирование СППР – процесс формирования (адаптации) структуры и состава (конфигурации) модельного и программно-технического инструментария СППР, а также информационных ресурсов и средств автоматизированного выбора методов получения, обработки и анализа информации, адекватных решаемым задачам управления и принятия решений в условиях критических ситуаций различной природы и масштаба. То есть выбор и настройка функциональных блоков СППР и определение взаимосвязей между ними для достижения поставленных целей и для удовлетворения информационных потребностей лиц, принимающих решения, и нормативных требований в процессе управления.

Структурная модель процесса принятия решений в СППР СЦ

Принятие решений является одним из китов, на которых держится управление. Упрощенно, управление рассматривается как последовательность выработки, принятия и реализации решений.

От решения во многом зависит будущее объекта управления. Своевременные и «правильные» решения – залог безопасности и устойчивого развития социально-экономических систем, обеспечение чего в особенности важно для экономики и обороноспособности страны. Процесс принятия решений не является одномоментным актом, а представляет собой неразрывную цепь логических и интуитивных суждений и выводов, составляющих единую процедуру обоснования и выбора лучшей альтернативы.

Согласно работе [3], технология принятия решений включает три основных этапа: сбор информации, поиск и нахождение альтернатив, выбор лучшей альтернативы. На первом этапе с применением современных средств мониторинга собирается вся доступная на момент принятия решения информация о некоторой ситуации: фактические оперативные данные, статистическая и экспертная информация. Второй этап связан с определением того, что можно, а чего нельзя делать в имеющейся ситуации, т.е. с определением вариантов решений (альтернатив). Третий этап включает в себя сравнение альтернатив и выбор наилучшего варианта (или вариантов) решения. При использовании современных средств автоматизации управленческой деятельности технологию принятия решений целесообразно дополнить еще двумя этапами: этапом формализации задач и этапом визуализации подготовленных вариантов решения проблемы. Формализация подразумевает «перевод» сформулированной лицом, принимающим решение, задачи на язык, «понятный» компьютеру, представление ее в виде, допускающем только однозначную интерпретацию. Визуализация призвана обеспечить обратную процедуру – перевод спецификации решения, полученной на формальном компьютерном языке, в представление, понятное и легко интерпретируемое лицом, принимающим решение.

Управление развитием и безопасностью социально-экономических систем в системе распределенных СЦ представляет собой сложный многоэтапный процесс, по своей структуре многофункциональный и в общем случае включает в себя такие функции управления как целеполагание, стратегическое планирование, оперативное управление, а также функции мониторинга, учета, контроля исполнения и координации. На каждом этапе для реализации соответствующих функций управления требуются средства информационно-аналитической поддержки принятия решений, адекватные задачам управления социально-экономическими системами (рис. 1). Под информационной поддержкой, согласно работе [4], понимается механизм управления, при котором управляющее воздействие носит неформализованный характер, и субъекту управления предоставляется информация о ситуации, ориентируясь на которую, он получает возможность корректировать как свое поведение, так и объекта управления.



Рис. 1. Функциональная структура управления социально-экономическими системами в СЦ

Структурная модель процесса принятия решений в СЦ включает всю совокупность выполняемых функций управления, процедур получения и обработки информации о влиянии внешних и внутренних факторов на состояние управляемых объектов, связей между ними и внешней средой. Сквозной анализ информации в процессе управления обеспечивает оценку потенциальных рисков

реализации угроз различной природы и возможность формирования вариантов решений, направленных на минимизацию этих рисков.

Общая схема процесса принятия решений в СЦ схематично представлена на рис. 2. В работе [5] делается допущение, что такая обобщенная структура процесса принятия решений является универсальной для всех видов социально-экономических систем независимо от их уровня. Поэтому независимо от типа и режима функционирования СЦ технология принятия решений в нем практически идентична. На рис. 2 субъекты управления СЦ (эксперты, лица, принимающие решения, системные аналитики и т.д.) являются основными потребителями информации, которая собирается, генерируется и передается в процессе принятия решений в условиях критических ситуаций на объектах управления и на основе которой производится формирование множества обоснованных вариантов решений и выбор окончательного из них.

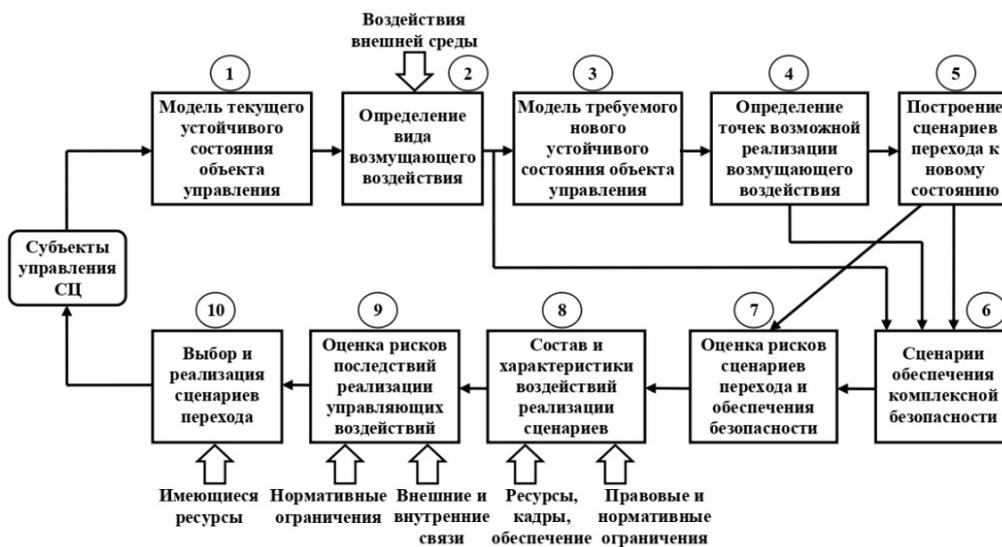


Рис. 2. Общая схема процесса принятия решений в СЦ

Эффективность принимаемых СЦ решений определяется полнотой и достоверностью, используемой в процессе ситуационного управления информацией, и своевременностью ее поступления. В реальных условиях получение информации такого качества зачастую либо существенно затруднено, либо требует больших временных и ресурсных затрат. Поэтому принятие решений в СЦ практически всегда происходит в условиях не полной ситуационной осведомленности, т.е. информации о состоянии объектов управления и внешней среды. Кроме того, преобладание качественных характеристик влияющих факторов (угроз), наряду с их количественными показателями, вероятностный характер угроз, временные ограничения на принятие решений, а также человеческий фактор во многом повышают субъективность принимаемых решений и в некоторых случаях выступают барьером на пути получения пусть и приближенных по отношению к действительности, но однозначных оценок этих решений.

Модель типового процесса принятия решений, предложенную в исследовании [5], можно расширить на область управления безопасностью социально-экономических систем посредством СЦ. Эта модель включает в себя следующий набор взаимосвязанных процедур:

1. Построение концептуальной модели текущего состояния управляемых объектов и формирование моделей организационных структур управления ими с учетом внутренних и внешних взаимосвязей и имеющейся информации о влиянии на них различных факторов.

2. Идентификация источников потенциальных угроз и опасностей для управляемых объектов, анализ и ранжирование возможных возмущающих воздействий на эти объекты и определение негативных факторов, порождающих критические ситуации, возникновение которых приводит к выходу управляемых объектов из области устойчивых состояний. При этом для критически важных объектов при принятии решений СЦ руководствуется общими моделями угроз и регламентирующими документами, нормативно утвержденными органами обеспечения безопасности, входящими в состав Совета безопасности Российской Федерации – МВД, ФСБ, МЧС, ФСТЭК, МИД, ФСО и др.

3. Формирование информационной модели нового требуемого состояния объектов управления и их внешнего окружения с учетом новых нормативных требований к объектам или всей системе управления в целом. Анализ моделей текущего и требуемого состояния позволяет определить точки и сценарии необходимых изменений в структуре управления.

4. Идентификация точек возможной реализации угроз (уязвимостей) в структуре управляемых объектов и анализ вероятных сценариев развития критических ситуаций, что определяет состав комплекса необходимых антикризисных мероприятий по повышению безопасности функционирования объектов управления, подконтрольных СЦ.

5. Синтез сценариев перехода управляемых объектов к новым требуемым состояниям безопасности с учетом имеющихся ресурсов, функциональных и нормативных ограничений.

6. Формирование множества ранжированных сценариев обеспечения комплексной безопасности управляемых объектов как единого целого при реализации угроз различной природы на основе оценки эффективности применяемых мер и средств защиты в условиях возникновения критических ситуаций случайного или предсказуемого характера.

7. Оценка системных рисков сформированного набора сценариев перехода объектов управления СЦ в новое состояние и обеспечение безопасности их функционирования.

8. Анализ применимости отобранного множества сценариев в заданных условиях и определение приемлемых вариантов состава и характеристик управляющих воздействий реализации этих сценариев на основе оценки необходимых для этого ресурсов и реальных возможностей управляемых объектов и системы управления СЦ в целом.

9. Оценка рисков последствий реализации выбранных вариантов управляющих воздействий с учетом внешних и внутренних связей управляемых объектов и системы СЦ.

10. Выбор и реализация субъектами управления СЦ сценария действий по обеспечению безопасности управляемых объектов, планирование проведения необходимых антикризисных мероприятий и контроль их исполнения.

Энтропийный подход к оценке качества информационной структуры СППР СЦ

Цифровизация государственного и регионального управления, связанная, главным образом, с внедрением средств интеллектуальной поддержки принятия решений в работу системы распределенных СЦ, является нетривиальной многоаспектной задачей, требующей научной проработки на всех уровнях информатизации управленческой деятельности. Для принятия обоснованного решения об использовании той или иной СППР в структуре СЦ корпоративного, муниципального, регионального или федерального уровня необходимо определить:

- состав и конфигурацию программно-технических средств СППР, соответствующих функциональным и нефункциональным требованиям рассматриваемого типа СЦ, а также информационным потребностям субъектов управления данного СЦ;
- возможные системные эффекты от применения СППР в составе СЦ и способ их количественного измерения;
- стоимость внедрения и последующей эксплуатации СППР СЦ, а также соответствие предполагаемых затрат ожидаемым эффектам.

Выбор конфигурации СППР, оценка ее эффективности и последующая интеграция в информационно-управляющую инфраструктуру СЦ – это сложный многоэтапный, зачастую итеративный процесс, особенно в динамических условиях изменения внешнего окружения СЦ, представляющий собой иерархию решений различной степени общности. Верхний уровень должен характеризоваться обобщенной оценкой целостного, системного эффекта внедрения СППР в СЦ. Нижестоящие решения используют частные целевые показатели эффективности внедрения программно-технических средств СППР. При этом критерии всех уровней должны быть согласованы.

В качестве интегрального показателя эффективности внедрения СППР в структуру СЦ предлагается использовать энтропийный подход к оценке качества решений [6]. Для реализации этого подхода необходимо:

- 1) провести специальные исследования системы управления СЦ;
- 2) упорядочить и классифицировать принимаемые решения по содержанию и количеству потребляемой информации;

3) установить объемы информационного обмена между звеньями системы управления СЦ в процессе выработки и реализации решений.

Информационные потребности СЦ и содержание его управленческой деятельности определяются информационной структурой решений, принимаемых в звеньях иерархии управления. Поэтому для выбора критериев оценки эффективности СППР СЦ требуется провести анализ информационной структуры решений, принимаемых в СЦ и составляющих в совокупности информационную инфраструктуру управления СЦ. Проведем такой анализ на некотором гипотетическом решении, содержащем все элементы классической системной процедуры принятия решения.

Для принятия решения необходима информация, содержащая следующие сведения: цели и задачи СЦ, критерии деятельности и границы управляемости объектов мониторинга, состояние объектов управления, механизмы функционирования, закономерности и тенденции развития этих объектов, возможные изменения условий деятельности СЦ с учетом прогноза динамики внешней среды СЦ, альтернативные стратегии деятельности СЦ, возможные альтернативы решения, последствия реализации альтернатив, механизмы выбора лучшей альтернативы.

Информация, необходимая для принятия решения в СЦ, характеризуется двумя взаимосвязанными показателями – количеством I , условно определяющим степень ситуационной осведомленности, и неопределенностью, выраженной через энтропию E . Каждая составляющая информационной структуры решения представляет собой набор количественных или качественных параметров.

Неопределенность информации выражается в том, что действительные (истинные) значения параметров неизвестны. Лицо, принимающее решение, может определить только интервалы I , содержащие возможные значения этих параметров. Для каждого решения объективно существует допустимая точность задания информации, т.е. минимальные интервалы b значений параметров, обеспечивающих необходимую подробность описания управляемого процесса.

Если информация о каком-либо параметре отсутствует, то интервал I будет содержать все возможные значения этого параметра, т.е. I будет совпадать с интервалом его определения $\sup I = I$. В другом крайнем случае, если вся информация о том или ином параметре известна, то интервал его возможных значений I будет совпадать с допустимым интервалом точности $I = b$. При полной информации интервалы I и b превращаются в точку.

В реальной практике управления социально-экономическими системами посредством СЦ лицо, принимающее решение, всегда имеет хоть какую-либо информацию о возможных значениях интересующих его параметров, т.е. имеет место некоторая промежуточная ситуация, когда I находится в интервале $\sup I > I > b$. Введение допустимого интервала точности b позволяет перевести континуальное множество числовых значений параметров управляемого процесса в ограниченное конечное множество. Это дает возможность использовать формулу К. Шеннона [7] для описания неопределенности решения.

Процедура принятия решения представляет собой итеративный процесс последовательного разрешения неопределенности информации, т.е. уменьшения интервалов I возможных значений параметров, составляющих исходную информацию.

Будем опираться на предложенные в ходе предыдущих исследований аксиомы [8]:

Аксиома 1. Каждому количеству информации о любом параметре, необходимом для принятия решения, может быть однозначно сопоставлен некоторый минимальный интервал I , содержащий истинное значение этого параметра.

Аксиома 2. Истинное значение любого параметра, необходимого для принятия решения, с равной вероятностью находится в любой точке интервала I .

Аксиома 3. Длина минимального интервала I истинного значения любого параметра, необходимого для принятия решения, есть невозрастающая функция количества информации о данном параметре.

Пусть на каждый момент процедуры принятия решения для всех параметров $j \in J$, составляющих информацию, определены допустимые интервалы точности задания численных значений $b \in B$ и интервалы возможных значений $l_j \in L$, где L – область возможных состояний объекта управления или область возможных решений. Разобьем интервалы возможных значений параметров l_j вектора L на участки длиной b_j . Каждый интервал содержит N_j участков l_j :

$$N_j = \frac{l_j}{b_j}. \quad (1)$$

Вероятность попадания численного значения j параметра в K_j участок интервала l_j обозначим P_{K_j} , где $K_j = 1 - N_j$. В силу независимости компонент вектора L полная энтропия неполноты информации согласно К. Шеннону определяется формулой

$$E_{pol} = - \sum_{j=1}^J \sum_{K_j=1}^{N_j} P_{K_j} \log P_{K_j}. \tag{2}$$

Назовем E_{pol} – полной энтропией решения. Величина полной энтропии решения E_{pol} определяется вектором допустимого интервала точности B и областью возможных состояний управляемого объекта L . Уменьшение B при $L = \text{const}$ увеличивает энтропию, и наоборот. В процессе принятия решений B обычно не меняется, а L уменьшается, что ведет к уменьшению энтропии. Величина P_{K_j} в выражении (2) – это вероятность того, что j -й параметр из информации, необходимой для принятия решения, примет значение из K_j участка интервала l_j .

В общем случае P_{K_j} имеет вероятностный смысл. Однако законы распределения истинных значений параметров управляемого процесса в выбранных интервалах L , как правило, неизвестны. В этих случаях обычно прибегают к экспертным оценкам, т.е. к субъективным вероятностям, выражающим степень предпочтения лицом, принимающим решение, одних значений параметров перед другими. Вместе с тем в большинстве случаев субъекты управления или эксперты не имеют оснований для предпочтения одних значений параметров другим. В этой ситуации вводится естественное допущение о том, что распределение истинных значений параметров подчиняется равномерному закону. Тогда вероятность P_{K_j} попадания истинного значения параметра j в K_j участок интервала l_j определится формулой

$$P_{K_j} = \frac{b_j}{l_j}, \tag{3}$$

и выражение, определяющее полную энтропию решения, примет вид

$$E_{pol} = - \sum_{j=1}^J \log \frac{1}{N_j}. \tag{4}$$

Предлагаемый подход к практической оценке неопределенности информации носит универсальный характер и может быть применен и к качественным показателям, не имеющим количественной меры. Например, если при конфигурировании СППР СЦ не может быть отдано предпочтение ни одной из выдвинутых альтернатив ее структуры и состава, то неопределенность выбора конфигурации может быть представлена выражением

$$E_{pol} = - \log \frac{1}{n}, \tag{5}$$

где n – число рассматриваемых альтернатив.

Информацию, необходимую для принятия решений в СЦ, можно условно разделить на три основные категории [8]:

1. Информация, заранее накопленная в системе управления СЦ и потенциально готовая к использованию в процессе принятия решений. Эта информация может содержать сведения обо всех составляющих информационной структуры решения. Неопределенность заранее накопленной информации характеризуется ее неполнотой, неполной достоверностью и неполным соответствием содержанию решения. Кроме того, информация может быть трудно доступной, и может отсутствовать резерв времени на ее полный сбор и обработку. Введем обозначение E_{zmi} – неопределенность заранее накопленной информации. Источниками E_{zmi} являются: плохая организация статистической и информационной службы СЦ, отсутствие или недостаток знаний о закономерностях и механизмах функционирования управляемых объектов и внешней среды, принципиальная невозможность надежной оценки тех или иных параметров управляемых объектов (например, человеческого фактора и т.п.), искажение информации субъектами управления СЦ, сферы интересов и ответственности

которых в общем случае не совпадают, прочие конфликтные ситуации и коллизии в системе управления СЦ. Разрешение E_{zni} связано с трудозатратами на поиск и обработку информации. Эффективным путем решения проблемы оперативного использования накопленных знаний является внедрение современных информационных технологий и средств моделирования в систему управления СЦ.

2. Информация, получаемая с помощью средств мониторинга или по другим каналам связи в режиме реального времени. Эта информация включает оперативную информацию, получаемую непосредственно в процессе принятия решения, и новую информацию, генерируемую путем аналитической переработки всей известной информации с использованием математических методов и моделей предметной области. В исключительных случаях, когда принимаемые в СЦ решения носят стратегический характер и определяют будущее состояние объектов управления, например, социально-экономических систем, могут проводиться специальные научные исследования, в том числе междисциплинарные, с привлечением экспертов и системных аналитиков. Информация этой категории содержит все объективные сведения о состоянии объекта управления, тенденциях его развития, будущих условиях функционирования, стратегии деятельности, возможных альтернативных решениях и критериях выбора лучшей альтернативы. Эта информация формирует область возможных значений параметров $L = \{l_j\}$. Введем обозначение E_r – неопределенность информации, разрешаемой логико-аналитическими методами. E_r существенно зависит от величины E_{zni} , содержащей знания о механизме и закономерностях функционирования объекта управления, а также от возможностей объективных методов разрешения неопределенности, связанной, например, с искажениями информации при принятии решений в конфликтной ситуации.

3. Информация, получаемая какими-либо объективными методами. На практике неопределенность этой информации разрешается волевым решением субъекта управления, который выбирает то или иное значение параметра из объективно определенного интервала L , руководствуясь своим опытом и интуицией. При принятии решения в конфликтной ситуации для разрешения неопределенности, связанной с возможными действиями противостоящей стороны, субъект управления вступает в рефлексивную игру и пытается реализовать рефлексивное управление противником [9]. Акт принятия решения всегда происходит в условиях неопределенности. Это объясняется, с одной стороны, принципиальной невозможностью полного познания любого явления или объекта, ограниченностью знаний о ситуации и познавательных возможностей субъекта управления, а с другой – ограничением времени, выделяемого на принятие решения. При принятии решения в конфликтной ситуации всегда существует неопределенность информации о состоянии противника и возможном характере его действий. Таким образом, при реализации процедуры принятия решения всегда остается неопределенность, разрешаемая путем субъективного выбора. Назовем эту неопределенность остаточной неопределенностью решения и обозначим как E_{ost} .

На основании изложенного полная энтропия решения E_{pol} определяется следующим образом:

$$E_{pol} = E_{zni} + E_r + E_{ost}. \quad (6)$$

Составляющие полной энтропии не являются независимыми, так как получение информации одной группы позволяет генерировать информацию других групп; например, знание о механизме функционирования объекта позволяет построить его модель, с помощью которой, в свою очередь, можно дополнить исходную информацию. Однако на каждый определенный момент процесса принятия решения объективно существуют неопределенности всех групп, что и отражено в выражении (6).

Важной характеристикой системы управления СЦ является начальная неопределенность решения E_0 или неопределенность на момент начала реализации процесса принятия решения. Начальное значение полной энтропии решения $E_{pol} = E_0$ на момент времени $t = 0$, где $t \in T = [0, T]$ – время, выделенное на принятие решения. Начальная неопределенность решения E_0 характеризует степень стабильности функционирования управляемых объектов, внутренние и внешние условия их деятельности и является одним из важных индикаторов, на который необходимо ориентироваться при организации управления социально-экономическими системами с помощью СЦ.

Исследование моделей показателей эффективности СППР СЦ

Рассмотрим зависимость неопределенности E_{pol} от трех главных факторов, определяющих качество решения – количества информации I , начальной неопределенности решения E_0 и времени

$t \in T = [0, T]$, отведенного на принятие решения. Процесс разрешения неопределенности можно условно разделить на два взаимосвязанных подпроцесса:

- 1) цепь логических операций обработки исходной информации, позволяющих сделать объективные выводы об интервале, содержащем истинные значения параметров, определяющих решение;
- 2) выбор значения этих параметров из объективно определенного интервала, осуществляемый волевым решением субъекта управления, основанным на его опыте и интуитивно-логическом понимании закономерностей и тенденций управляемого объекта или процесса.

Деление единого неразрывного процесса принятия решения на два подпроцесса предпринято для того, чтобы выделить в явном виде две его составляющие – объективную и субъективную, отношения между которыми составляют суть проблем, рассматриваемых в теории принятия решений [9, 10].

Основной закономерностью процесса разрешения неопределенности E_0 является зависимость величины интервалов, содержащих истинное значение параметров от величины объективной информации I об этих параметрах. Чем меньше информации, тем шире интервалы, т.е. область возможных значений параметров L , тем выше роль субъективных факторов в принятии решения, и наоборот. В случае же полного отсутствия объективной информации об управляемом процессе область возможных значений параметров L совпадает с областью их определения $\text{sup } L$. В общем виде зависимость степени разрешения неопределенности решения от количества объективной информации $E_{pol} = f(I)$ показана на рис. 2.

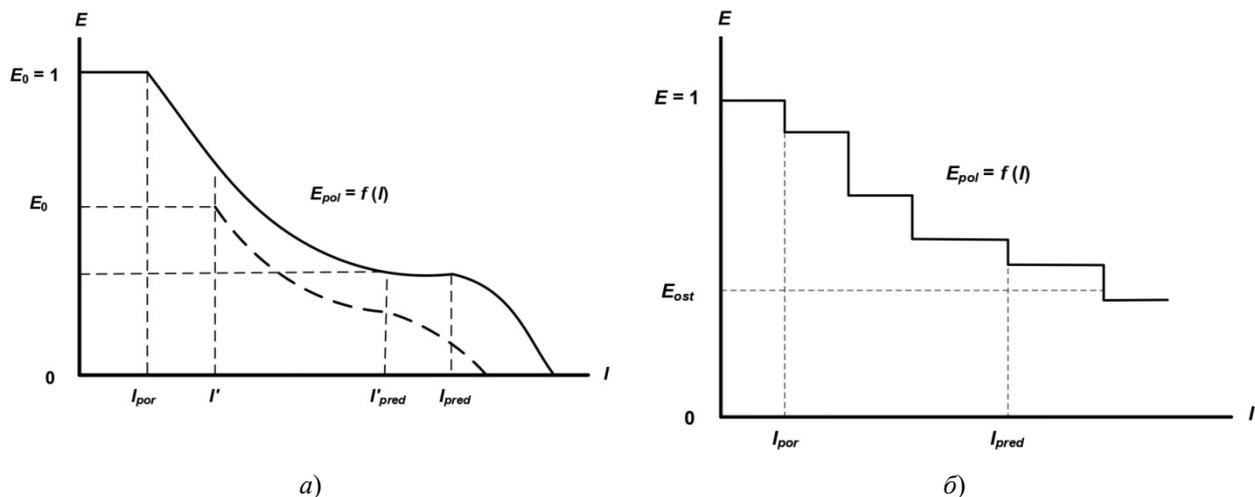


Рис. 2. Зависимость степени разрешения неопределенности решения от количества объективной информации: а – огибающая функция; б – ступенчатая функция

На рис. 2,а $I = 0$ соответствует полному отсутствию информации; I_{por} – это то минимальное (пороговое) количество исходной информации, ниже которого никаких суждений по поводу принимаемого решения сделать нельзя; I_{pred} – максимальное количество информации, которое может быть использовано при принятии решения, когда ее дальнейшее накопление не уменьшает область возможных значений параметров L ; I' – величина заранее накопленной информации. Каждому количеству заранее накопленной информации соответствует величина начальной неопределенности решения E_0 . Функция $E_{pol} = f(I)$ построена в предположении, что для всех значений E_0 сохраняются одни и те же условия принятия решения, время, выделенное на принятие решения, и метод обработки информации.

Зависимости, представленные на рис. 2,а, отражают общее свойство, заключающееся в том, что приращение количества информации оказывает наибольшее влияние на уменьшение неопределенности E_{pol} на первоначальном этапе ее накопления, а затем этот эффект уменьшается, а после достижения I_{pred} исчезает совсем. Экспоненциальный характер и асимптотичность функции $E_{pol} = f(I)$ должна учитываться при построении СППР СЦ и в процессе информационной поддержки ситуационного управления в СЦ.

Количество информации I_{pred} означает предел возможностей объективных методов разрешения неопределенности. Дальнейшее накопление информации не позволяет сузить за время T интервалы возможных значений параметров L .

Зависимость степени разрешения неопределенности субъективного выбора от количества информации подчиняется тем же закономерностям, которые свойственны первому подпроцессу принятия решений, что и отражено на рис. 2,а. Вид функции $E_{pol} = f(I)$ для одного и того же решения существенно зависит от величины начальной неопределенности E_0 , характеризующей уровень знаний экспертов и лиц, принимающих решения, в данной предметной области управления, а также глубину предварительной научной проработки решаемых проблем. Другими словами, конкретный вид функции $E_{pol} = f(I)$ зависит от начального тезауруса субъекта управления. Тезаурусом определяется, прежде всего, содержание требуемой информации для принятия решения. Чем шире тезаурус, тем меньше E_0 и тем меньше потребуются дополнительных уточняющих сведений о решаемой проблеме. При этом в процессе принятия решения тезаурус может изменяться под воздействием новой информации. Соответственно будут меняться и требования к исходной информации.

В случае отсутствия тезауруса ($E_0 = 1$), когда субъект управления не имеет никаких представлений о сущности и условиях деятельности управляемого объекта, все элементы информационной структуры формируются им в процессе принятия решения. Этот крайний случай скорее абстракция и характеризуется необходимостью сбора, обработки и анализа больших объемов требуемой информации для принятия решения за ограниченное время T . В реальной практике управления социально-экономическими системами различного масштаба начальная неопределенность решения всегда находится в интервале $E_{ost} < E_0 < 1$.

Кривые на рис. 2,а отражают общую закономерность, состоящую в том, что чем больше информации об объекте управления накоплено и обработано заранее, т.е. чем больше тезаурус, тем меньше информации требуется искать и обрабатывать непосредственно в процессе принятия решения и тем меньше конечная неопределенность решения, т.е. выше его качество. Необходимо отметить, что реальные зависимости $E_{pol} = f(I)$ являются ступенчатыми. На рис. 2,а представлена огибающая реальной функции. В действительности энтропия E_{pol} уменьшается дискретно (рис. 2,б).

Дискретное изменение энтропии объясняется тем, что смысл информации связан с ее количеством дискретно, физически может быть выражен только определенным количеством информации (квантом информации). Новое знание получается только путем переработки соответствующего количества информации. Для получения каждого кванта информации требуется определенное время, которое зависит, прежде всего, от метода сбора и способа обработки информации. От времени зависит величина конечной неопределенности решения E_{ost} .

Проведенный в предыдущем разделе анализ информационных аспектов принятия решений позволяет в качестве универсального критерия эффективности СППР СЦ принять остаточную энтропию решения E_{ost} . Этот показатель характеризует, с одной стороны, степень риска, которую берет на себя субъект управления, прекращая поиски строгого обоснования решения (путем уменьшения E_{ost}), а с другой – возможности применяемых методов выработки решений. Главным назначением введенной меры качества E_{ost} является сравнение методов и средств информационной поддержки принятия решений.

Наряду с абсолютным критерием E_{ost} удобно пользоваться относительной оценкой эффективности СППР СЦ:

$$R = 1 - \frac{E_{pol}}{E_0} < R_{max} = 1 - \frac{E_{ost}}{E_0}, \quad (7)$$

где R_{max} – предельно возможная эффективность СППР СЦ, когда вся объективная информация I_{pred} , необходимая для принятия решения, собрана и $E_{pol} = E_{ost}$. Величина R характеризует качество самой процедуры принятия решения, т.е. эффективность ее организации, применяемых методов и программно-технических средств в составе СЦ.

Практическое назначение критерия E_{ost} и его аналога R заключается в том, что с их помощью можно сравнивать и оценивать эффективность внедрения в практику принятия решений различных информационных технологий и средств моделирования составляющих структуру СППР СЦ.

Для каждого класса решений необходимо определить время T , отведенное на принятие решения в условиях критической ситуации, и зависимость E_{ost} и R от трудозатрат на сбор и обработку требуемой информации в заданном режиме функционирования СЦ (нормальный, предкризисный, чрезвычайный и т.д.). Зависимость эффективности СППР СЦ от трудозатрат Z представлена на рис. 3. Такой же вид имеет и зависимость $E_{ost} = f(Z)$. Эти зависимости отражают ресурсный аспект проблемы принятия решений.

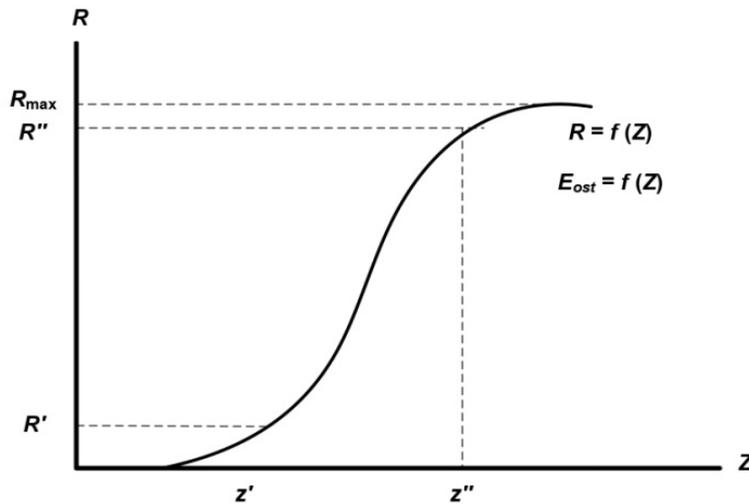


Рис. 3. Зависимость эффективности СППР СЦ от трудозатрат Z

Как видно из рис. 3, для каждого класса решений существует некоторый диапазон (z', z'') , определяемый количеством информации в диапазоне (I_{por}, I_{pred}) (рис. 2,а), в котором увеличение трудозатрат существенно сказывается на улучшении качества решения. Верхний предел этого диапазона z'' можно принять в качестве оценки «стоимости» подготовки информации для каждого рассматриваемого класса решений, поскольку за пределами z'' дальнейшие затраты малоэффективны. Следует отметить, что в существующих СЦ чрезвычайно сложно организовать работу большого коллектива специалистов по сбору и обработке информации в пределах ограниченного времени, выделенного на принятие решения. Современные исследования [4, 6] показывают, что качество принимаемых решений на региональном уровне управления, как правило, не превышает значений $R = 0,7-0,8$, тогда как $R_{max} > 0,85-0,9$.

Идея выбора подходящей конфигурации СППР СЦ основана на сопоставлении эффективности процедуры принятия решений без применения СППР в СЦ с эффективностью процедуры выработки и реализации решений, принимаемых уже с использованием СППР с различной конфигурацией средств информационной поддержки управления (моделей, методов и комплексов программ получения, обработки и анализа информации).

Пусть задано некоторое количество U возможных конфигураций средств информационной поддержки в СППР СЦ $v \in U$. Критерий эффективности конфигурации СППР с учетом предварительной подготовки информации будет иметь вид: $Q_v^E = \frac{E_{pol}^k v}{E_{pol}^k}$, а без учета предварительной подго-

товки информации, только для процесса принятия решения и фиксированного E_{pol} : $Q_v^R = \frac{R_v}{R}$. Критерии Q_v^E и Q_v^R показывают, во сколько раз увеличивается вероятность принятия лучшего решения при использовании СППР v -й конфигурации.

Для выбора подходящей конфигурации средств информационной поддержки, образующих СППР СЦ, по критерию «эффективность – стоимость», необходимо знать зависимость эффективности этих средств от затрат на их покупку, внедрение и эксплуатацию. Общий вид зависимости $Q = f(Z)$ представлен на рис. 4.

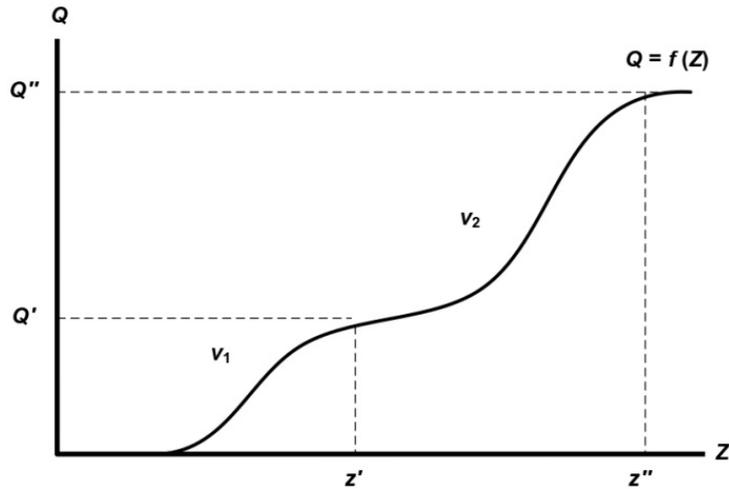


Рис. 4. Зависимость эффективности средств информационной поддержки СППР от затрат на их покупку, внедрение и эксплуатацию в составе СЦ

Характер зависимости $Q(z)$ говорит о том, что относительно недорогие конфигурации СППР, включающие стандартные базы данных и программно-технические средства, быстро исчерпывают свои возможности и затраты на их совершенствование после некоторого критического значения не эффективны. Переход к более сложным, интеллектуальным СППР, включающим базы знаний, информационно-аналитические системы, средства анализа больших данных, онтологические модели предметной области, а также новые системы связи и инфокоммуникационные технологии требуют значительных финансовых затрат, но и дают возможность существенно повысить качество принимаемых решений.

Критерий $Q = f(Z)$ позволяет количественно соизмерить затраты с ожидаемым эффектом повышения качества ситуационного управления в СЦ и на этой объективной основе выбирать наиболее подходящую конфигурацию СППР СЦ. Критерий эффективности СППР $Q = f(Z)$ исчисляется как гарантированная (предельная) оценка, т.е. принятие решений происходит в наихудших условиях. Это позволяет в максимальной степени освободиться от субъективных моментов в оценке качества структуры СППР СЦ.

Возможны и другие постановки задачи выбора подходящей конфигурации СППР СЦ. Так, в большинстве СЦ качество управления определяется оперативностью принятия решений, основным критерием является время T . При этом решение может быть принято только в том случае, когда собрана и обработана вся необходимая информация, т.е. достигнута определенная степень разрешения неопределенности E_{pol} . Использование СППР в СЦ призвано повысить скорость поиска, передачи и обработки информации и уменьшить время принятия решения по сравнению с ситуацией, когда СППР не применяется.

Если средства для создания СППР СЦ фиксированы, определена предельная стоимость СППР (Z_{pred}), то задача может быть сформулирована следующим образом: найти такую конфигурацию СППР СЦ v_{opt} , которая обеспечивает $\min T_{v_{opt}}$ при $E_{pol} < E'_{ost}$ и $Z < Z_{pred}$, где E'_{ost} – допустимая величина остаточной энтропии решения.

Если ограничений на стоимость СППР не накладывается, то определяется некоторое желательное минимальное время принятия решения T_{pred} . В этом случае конфигурация СППР СЦ выбирается по $\min Z$ при условиях $T < T_{pred}$ и $E_{pol} < E'_{ost}$.

Реализация предложенного энтропийного подхода связана с необходимостью исследования действующих СППР СЦ для построения рассмотренных выше зависимостей $E_{pol} = f(I)$, $E_{ost} = f(Z)$, $Q = f(Z)$ и создания нормативной базы для элементов, составляющих различные конфигурации СППР СЦ.

Предложенные формальные модели критериев эффективности СППР (остаточная энтропия, оперативность, стоимость внедрения) и их зависимости могут быть использованы для количествен-

ной оценки ситуационной осведомленности лиц, принимающих решения, в СППР СЦ. В общем случае ситуационная осведомленность определяется соотношением между мощностями множества входной информации (ресурсов) зоны ответственности субъекта управления СЦ, изменяющейся без его участия, множества выходной информации (ресурсов), подконтрольных этому управляющему субъекту, и их долей в общем количестве информации (ресурсов), существенных для функционирования объекта управления или всей социально-экономической системы в целом [11]. Эти соотношения позволяют объективно оценить важность решений данного субъекта управления и учитывать эту важность при поиске баланса интересов всех лиц, принимающих решения в СППР СЦ и влияющих на характеристики отдельного объекта управления или совокупности объектов (системы).

Пусть значения общей ситуационной осведомленности и каждой из ее составляющих характеризуются неотрицательным числом с максимальным значением 1. Тогда формальная модель степени ситуационной осведомленности субъекта управления СЦ имеет вид

$$I^{SA} = I^{ER} \times I^{SU} \times I^{FU},$$

$$I^{ER} = \frac{n}{n+m}, I^{SU} = \frac{2 - \delta a^{own} - \delta a^{in}}{2 - (\delta a^{own})^2 - (\delta a^{in})^2}, I^{FU} = 1 - e^{-\tilde{T}}, T = \frac{\alpha}{\Phi |\Lambda \Phi|},$$

где I^{ER} – степень восприятия окружающей среды, равная отношению количества контролируемых лицом, принимающим решение, ресурсов к общему количеству ресурсов, влияющих на его сферу ответственности; I^{SU} – степень понимания ситуации или процесс синтеза элементов I^{ER} (мера близости текущего состояния управляемых объектов к идеальному); I^{FU} – степень прогноза будущего состояния объектов управления, которая определяется скоростью изменения ситуации в сфере ответственности субъекта управления; n – количество входных ресурсов в области ответственности

лица, принимающего решения; m – количество вырабатываемых им ресурсов; $\delta a^{own} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \delta a_j^2}$ – вектор невязок собственных критериев качества работы субъекта управления СЦ; $\delta a^{in} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \delta a_k^2}$ – вектор невязок входных ресурсов субъекта управления СЦ; Φ – критерий качества работы субъекта управления СЦ; T – интервал достоверного прогноза; \tilde{T} – сглаженное значение T ; α – параметр, задающий временную динамику функционирования субъекта управления, т.е. изменение его области ответственности в процессе принятия решений, $\alpha > 0$.

Согласно работе [11], необходимо учитывать асимптотические свойства компонентов модели ситуационной осведомленности, а именно:

- для I^{SU} : при $\delta a^{own} \rightarrow 0$ и $\delta a^{in} \rightarrow 0$ $I^{SU} \rightarrow 1$; при $\delta a^{own} \gg 1$ $I^{SU} \rightarrow 0$; при $\delta a^{in} \gg 1$ $I^{SU} \rightarrow 0$;
 - для I^{FU} : при $\Phi \rightarrow 0$ и $\Lambda \Phi \rightarrow 0$ $I^{FU} \rightarrow 1$, $T \rightarrow \infty$; при $|\Lambda \Phi| \rightarrow \infty$ $I^{FU} \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$;
- при $\Phi \gg 1$ $I^{FU} \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$.

Совместно с приведенными выше критериями технико-экономического обоснования эффективности СППР СЦ могут применяться и другие виды оценок и их комбинации. Так, на практике часто оперируют следующими критериями оценки качества архитектурных (системотехнических) и технологических решений в области информационного обеспечения СППР СЦ: своевременность предоставления требуемой информации для принятия решений, полнота оперативного отражения в СППР СЦ объектов учета и контекста критической ситуации, а также актуальность обновляемой информации на всех этапах процесса принятия решений. Для расчета этих показателей используются математические модели типовых информационных процессов, предложенные в работе [12], и национальные стандарты оценки качества информационных технологий и программных систем ГОСТ Р ИСО 25010-2015 [13] и ГОСТ Р ИСО 25040-2014 [14].

Для определения экономической эффективности внедрения СППР в СЦ может найти применение метод сбалансированной системы показателей BSC (Balanced Score Card) [15], обеспечивающий возможность оценки удовлетворения информационных потребностей лиц, принимающих решения в СЦ, за счет программно-технических средств (функциональных сервисов) СППР с учетом целей субъектов управления СЦ и моделей их взаимодействия на основе экспертно-имитационного

моделирования. По сути метод BSC позволяет определить, насколько ИТ-проект по внедрению СППР в СЦ соответствует целям ситуационного управления по сравнению с существующей системой управления в СЦ, и подобрать наиболее подходящую конфигурацию СППР СЦ для синтеза эффективных организационных структур и сценариев управления безопасностью социально-экономических систем в критических ситуациях на базе СЦ.

Эмпирическая оценка эргономической эффективности (юзабилити) СППР СЦ может быть получена на основе применения количественного метода анализа пользовательского интерфейса GOMS (Model of Goals, Objects, Methods, and Selection rules) [16]. С помощью этого метода можно рассчитать и сравнить временные затраты пользователей СППР СЦ при подготовке и поиске требуемой аналитической информации в процессе принятия решений для различных конфигураций СППР СЦ, а также с применением средств автоматизации управленческой деятельности и без их использования.

Приложение разработок на примере СЦ Мурманской области

В Мурманской области, как и по всей стране, создаются СЦ, которые предназначены для поддержки оперативного принятия управленческих решений и мониторинга социально-экономической ситуации в регионе. Однако на текущий момент они находятся еще в стадии развития. Результаты предварительных исследований по состоянию на февраль 2020 г. показали, что проектирование и разработка СЦ Главы Мурманской области практически завершена. Общая готовность данного СЦ к эксплуатации составляет 75 %. Техническое задание и реализация проекта выполнены на 100 %.

С применением рассмотренных моделей и методов на основе экспертных оценок и доступной статистической и проектно-технической отчетности о состоянии готовности СЦ установлено, что с точки зрения удовлетворения информационных потребностей субъектов управления СЦ по ряду показателей (ситуационная осведомленность, достоверность данных и полнота, оперативность получения требуемой информации для принятия решений и т.д.) эффективность функционирования СЦ невысока. Это связано с тем, что на текущий момент уровень готовности программно-технических средств СЦ составляет 80 %, в том числе готовность программного комплекса – 20 %, готовность аппаратного комплекса – 60 %, и дополнительно требуется развертывание и настройка информационно-коммуникационной инфраструктуры СЦ для стыковки с другими СЦ региона и интеграции его в систему распределенных СЦ. При этом в структуре СЦ региона практически отсутствует СППР как таковая.

Наши исследования показали, что внедрение средств интеллектуальной поддержки управленческой деятельности в работу программно-аппаратного комплекса СЦ Мурманской области, включающих имитационные модели прогнозирования показателей безопасности социально-экономического развития региона, мультиагентные модели сетецентрического управления безопасностью, методы оценки и анализа рисков нарушения безопасности критических инфраструктур региона и модели координации децентрализованного принятия решений, позволит повысить эффективность использования СЦ для задач регионального управления на 20–30 % и снизить совокупные ресурсные затраты на 5–10 % по сравнению с современным состоянием дел в этой сфере.

Заключение

В ходе исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ информационной структуры процесса принятия решений в СЦ региона, на основе которого определены базовые показатели качества функционирования СППР СЦ и исследованы зависимости между показателями эффективности. Это позволило оценить общие затраты на разработку и внедрение СППР в СЦ при различных вариантах конфигурации информационного и программно-технического обеспечения СЦ.

2. Исследована структурная модель процесса принятия решений в СЦ и реализующие ее процедуры, на основе чего предложена постановка общей задачи выбора конфигурации СППР СЦ по установленным критериям эффективности с учетом нормативных требований к режимам работы СЦ и составу используемых средств информационной поддержки.

3. Предложен комбинированный подход к оценке качества структуры и состава средств информационной поддержки управленческой деятельности в региональных СЦ, основанный на совместном использовании энтропийных моделей и качественных методов оценки эффективности СППР СЦ. Применение подхода позволяет определить наиболее подходящую конфигурацию про-

граммно-аппаратных средств СППР СЦ с точки зрения обеспечения ситуационной осведомленности и оперативности формирования аналитической информации для принятия обоснованных решений на всех уровнях иерархии управления.

Предложенный в работе модельный инструментарий нашел применение при решении задач оценки эффективности СППР СЦ Мурманской области. В результате апробации были сформированы рекомендации по оптимизации структуры и состава СППР данного СЦ с учетом функциональных задач и информационных потребностей субъектов управления СЦ.

Несмотря на то, что получаемые оценки эффективности СППР носят вероятностный характер, они могут использоваться для сравнительных целей разных системотехнических и технологических решений при создании новых и совершенствовании существующих СЦ. Модели гибко адаптируются для всех типов СППР СЦ и являются центральным элементом блока информационно-аналитической поддержки в многоуровневой системе управления региональной безопасностью, построенной на базе сети распределенных СЦ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № 0226-2019-0035) и при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-07-00167-а).

Библиографический список

1. Зацаринный, А. А. Системотехнические подходы к созданию системы поддержки принятия решений на основе ситуационного анализа / А. А. Зацаринный, А. П. Сучков // Информатика и ее применение. – 2016. – Т. 10, вып. 4. – С. 105–113.
2. Доррер, Г. А. Методы и системы принятия решений / Г. А. Доррер. – Красноярск : СФУ, 2016. – 209 с.
3. Simon, H. A. The new science of management decision / H. A. Simon. – Prentice-Hall, 1977. – 175 p.
4. Маслобоев, А. В. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : КНЦ РАН, 2016. – 222 с.
5. Черешкин, Д. С. Модель процесса принятия решений в организационной системе / Д. С. Черешкин // Проблемы современной науки и образования. – 2017. – № 32 (114). – С. 16–24.
6. Цыгичко, В. Н. Безопасность критических инфраструктур / В. Н. Цыгичко, Д. С. Черешкин, Г. Л. Смолен. – Москва : УРСС, 2019. – 200 с.
7. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1963. – 830 с.
8. Цыгичко, В. Н. Руководителю о принятии решений / В. Н. Цыгичко ; предисл. В. А. Лефевра. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва : Красанд, 2010. – 352 с.
9. Новиков, Д. А. Рефлексия и управление: математические модели / Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили. – Москва : Физматлит, 2013. – 412 с.
10. Ларичев, О. И. Наука и искусство принятия решений / О. И. Ларичев. – Москва : Наука, 1979. – 200 с.
11. Кулик, Б. А. Количественная оценка ситуационной осведомленности в системе концептуального моделирования / Б. А. Кулик, А. Я. Фридман // Системный анализ в проектировании и управлении : тр. XXIII Междунар. науч. конф. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2019. – С. 449–460.
12. Безкоровайный, М. М. Инструментально-моделирующий комплекс для оценки качества функционирования информационных систем «КОК» Руководство системного аналитика / М. М. Безкоровайный, А. И. Костогрызлов, В. М. Львов. – Москва : СИНТЕГ, 2000. – 116 с.
13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 49 с.
14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25040–2014. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Процесс оценки. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 51 с.
15. Мамаева, Г. А. Методологические основы повышения и оценки экономической эффективности проектов информатизации / Г. А. Мамаева. – Санкт-Петербург : СПбГИЭУ, 2012. – 220 с.
16. Раскин, Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем : пер. с англ. / Д. Раскин. – Санкт-Петербург : Символ-Плюс, 2007. – 272 с.

References

1. Zatsarinnyy A. A., Suchkov A. P. *Informatika i ee primenenie* [Computer science and its application]. 2016, vol. 10, iss. 4, pp. 105–113. [In Russian]
2. Dorrer G. A. *Metody i sistemy prinyatiya resheniy* [Decision-making methods and systems]. Krasnoyarsk: SFU, 2016, 209 p. [In Russian]

3. Simon H. A. *The new science of management decision*. Prentice-Hall, 1977, 175 p.
4. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KNTs RAN, 2016, 222 p. [In Russian]
5. Chereshekin D. S. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Problems of modern science and education]. 2017, no. 32 (114), pp. 16–24. [In Russian]
6. Tsygichko V. N., Chereshekin D. S., Smolyan G. L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur* [Security of critical infrastructures]. Moscow: URSS, 2019, 200 p. [In Russian]
7. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics]. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1963, 830 p. [In Russian]
8. Tsygichko V. N. *Rukovoditel'nyy o prinyatii resheniy* [To the manager about decision making]. 3rd ed, rev. and suppl. Moscow: Krasand, 2010, 352 p. [In Russian]
9. Novikov D. A., Chkhartishvili A. G. *Refleksiya i upravlenie: matematicheskie modeli* [Reflection and control: mathematical models]. Moscow: Fizmatlit, 2013, 412 p. [In Russian]
10. Larichev O. I. *Nauka i iskusstvo prinyatiya resheniy* [The science and art of decision making]. Moscow: Nauka, 1979, 200 p. [In Russian]
11. Kulik B. A., Fridman A. Ya. *Sistemnyy analiz v proektirovaniy i upravlenii: tr. XXIII Mezhdunar. nauch. konf.* [System analysis in design and management: proceedings of the XXIII international scientific conf.]. Saint-Petersburg: SPbPU, 2019, pp. 449–460. [In Russian]
12. Bezkorovaynyy M. M., Kostogryzov A. I., L'vov V. M. *Instrumental'no-modeliruyushchiy kompleks dlya otsenki kachestva funktsionirovaniya informatsionnykh sistem «KOK» Rukovodstvo sistemnogo analitika* [Tool-modeling complex for evaluating the quality of functioning of information systems " KOK " system analyst's Guide]. Moscow: SINTEG, 2000, 116 p. [In Russian]
13. GOST R ISO/MEK 25010–2015. *Informatsionnye tekhnologii. Sistemnaya i programmnaya inzheneriya. Trebovaniya i otsenka kachestva sistem i programmnogo obespecheniya (SQuaRE). Modeli kachestva sistem i programmykh produktov* [GOST R ISO / IEC 25010-2015. Information technology. System and software engineering. Requirements and quality assessment of systems and software (SQuaRE). Quality models for systems and software products]. Moscow: Standartinform, 2015, 49 p. [In Russian]
14. GOST R ISO/MEK 25040–2014. *Informatsionnye tekhnologii. Sistemnaya i programmnaya inzheneriya. Trebovaniya i otsenka kachestva sistem i programmnogo obespecheniya (SQuaRE). Protseess otsenki* [GOST R ISO / IEC 25040-2014. Information technology. System and software engineering. Requirements and quality assessment of systems and software (SQuaRE). Evaluation process]. Moscow: Standartinform, 2014, 51 p. [In Russian]
15. Mamaeva G. A. *Metodologicheskie osnovy povysheniya i otsenki ekonomicheskoy effektivnosti proektov informatizatsii* [Methodological bases for improving and evaluating the economic efficiency of Informatization projects]. Saint-Petersburg: SPbGIEU, 2012, 220 p. [In Russian]
16. Raskin D. *Interfeys: novye napravleniya v proektirovaniy komp'yuternykh sistem: per. s angl.* [Interface: new directions in computer system design: translation from English]. Saint-Petersburg: Simvol-Plyus, 2007, 272 p. [In Russian]

Маслобоев Андрей Владимирович

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования,
Кольский научный центр
Российской академии наук
(Россия, Мурманская обл.,
г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Цыгичко Виталий Николаевич

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт системного анализа,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, пр. 60-летия Октября, 9)
E-mail: vtsygichko@inbox.ru

Masloboev Andrey Vladimirovich

doctor of technical sciences, associate professor,
leading research,
Institute for Informatics and Mathematical Modeling,
Kola Science Centre of the Russian Academy
of Sciences
(14 Fersmana street, Apatity,
Murmansk region, Russia)

Tsygichko Vitaliy Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
Institute for System Analysis,
Federal Research Center
«Computer Science and Control
of the Russian Academy of Sciences»
(9 60-letiya Oktyabrya avenue, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Маслобоев, А. В. Анализ информационной структуры и конфигурирование систем поддержки принятия решений региональных ситуационных центров / А. В. Маслобоев, В. Н. Цыгичко // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 68–84. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-8.

В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков

ПОРОШКОВЫЕ КОМПОЗИТЫ И НАНОМАТЕРИАЛЫ В ГИБКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ

V. P. Perevertov, I. K. Andronchev, N. K. Yurkov

POWDER COMPOSITES AND NANOMATERIALS IN FLEXIBLE MATERIALS TECHNOLOGIES FOR FORMING PARTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Формообразование деталей из наноматериалов и порошковых композитов традиционными и аддитивными (3D) технологиями в условиях «умных» производственных систем (УПС) представляет сложную динамическую систему, элементами которой необходимо управлять с учетом изменения параметров технологического процесса и оборудования для получения качественной детали (изделия). *Материалы и методы.* Гибкость и экономичность новой продукции на основе УПС с цифровым моделированием с применением синтеза традиционных и аддитивных технологий зависит от качества материала. *Результаты и выводы.* Анализ методов получения наноматериалов показал, что в зависимости от способа получения нанокристаллических материалов формируется различная структура наноматериалов, влияющая на гибкость и скорость внедрения новых технологий, которые необходимо контролировать и диагностировать лазерными, инфракрасными, волоконно-оптическими датчиками системы индустриальной компьютерной томографии для обеспечения высокого качества, безопасности и экологичности в условиях работы УПС «умной». В качестве источника энергии для технологий УПС рекомендуется применять энергию на основе лазерного и плазменного излучения; электронного луча и ионного воздействия с системами адаптивного диагностического (интеллектуального) управления.

Ключевые слова: наноматериалы, технологии, качество, датчики, контроль, диагностика, система, экономика.

Abstract. *Background.* The shaping of parts from nanomaterials and powder composites by traditional and additive (3D) technologies in the conditions of “smart” production systems (UPS) is a complex dynamic system, the elements of which must be controlled taking into account changes in the parameters of the technological process and equipment to obtain a quality part (product). *Materials and methods.* The flexibility and cost-effectiveness of new products based on UPS with digital modeling using a synthesis of traditional and additive technologies depends on the quality of the material. *Results and conclusions.* An analysis of the methods for producing nanomaterials showed that depending on the method for producing nanocrystalline materials, a different structure of nanomaterials is formed, affecting the flexibility and speed of introducing new technologies that need to be controlled and diagnosed by laser, infrared, fiber-optic sensors of an industrial computed tomography system to ensure high quality, safety and environmental friendliness in the conditions of operation of UPS “smart”. It is recommended to use energy based on laser and plasma radiation as an energy source for UPS technologies; electron beam and ion exposure with adaptive diagnostic (intelligent) control systems.

Keywords: nanomaterials, technology, quality, sensors, control, diagnostics, system, economy.

Формообразование деталей в транспортной и ракетно-космической промышленности отличаются выбором материалов, технологий и энергией, которыми необходимо управлять.

В машиностроении применяют как металлические, так и неметаллические материалы и сплавы, конструкционные и инструментальные стали, порошки из титана, алюминия, кобальта, никеля, молибдена, керамики, лития, их порошковые композиции с заданными физико-химическими свойствами и ультрадисперсные наноматериалы.

Компьютерное конструирование (моделирование) порошковых композитов и наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий изготовления деталей конструкционного и функционального назначения железнодорожной техники позволит:

- 1) повысить износостойкость в 3–4 раза и усталостную прочность при знакопеременном нагружении в 2–3 раза;
- 2) обеспечить твердость керамических составляющих с нанокристаллической структурой до 10 000 МПа;
- 3) восстанавливать детали с сохранением заданных характеристик;
- 4) получать углеродные и волокнистые базальтовые материалы с прочностью 2500–5000 МПа и композиционные материалы на их основе с полимерной и углеродной матрицей для железнодорожного машиностроения, включая газомоторные двигательные установки [1–8].

При изготовлении локомотивов, вагонов, НТТС и т.д. используют комплектующие сборочных единиц и детали из различных материалов с применением традиционных и аддитивных технологий, берут на вооружение совершенные методы расчетов конструкций с учетом перспективных изменений объема перевозок и других факторов, требующих внесения изменений в структуру железнодорожного парка. Применение прочных и легких материалов позволит уменьшить массу локомотива и увеличить срок службы металлических деталей, повысить надежность деталей и обеспечить долговечность и качество подвижного состава и НТТС.

Классификация методов получения объемных наноматериалов (рис. 1) и анализ методов и оборудования для получения ультрадисперсных (нанокристаллических) материалов показали, что в зависимости от того, какой используется способ получения нанокристаллических материалов: нанокристаллизация аморфных сплавов, плазменное, лазерное, электровзрывное и термическое испарение, механическое легирование в высокоэнергетических мельницах (атриторах), компактирование нанопорошка, интенсивная пластическая деформация (ИПД) и т.д., может сформироваться различная структура наноматериалов [5–14], которую необходимо контролировать и диагностировать.



Рис. 1. Классификация методов получения объемных наноматериалов

Требования к оптимальным методам получения наноструктурных материалов следующие:

- 1) получение ультрадисперсных (нанокристаллических, квазикристаллических) материалов необходимых размеров, формы и структуры без потери необходимых наноструктурных особенностей;
- 2) стабильность технологии производства наноразмерных порошковых материалов;
- 3) возможность контроля и диагностики агломерации частиц и распределения их по размерам;

- 4) экономичность производства нанокристаллических материалов;
- 5) безопасность обращения с ультрадисперсными порошками (наноматериалами).

Для выпуска высокотехнологичной продукции транспортной системы путем модернизации производства необходим переход от трудоемких технологий (**традиционных**) к наукоемким (**аддитивным** АF-технологиям – 3D-печать) и создание на их стыке **альтернативных (гибридных)** технологий типа spray forming, объединяющих в себя:

- 1) заготовительные технологии – литейные (плавка металла); обработка материалов давлением (ОМД), включая интенсивное пластическое деформирование (ИПД);
- 2) технологии обработки материалов резанием (ОМР) – механические, включая финишные и т.д.;
- 3) технологии распыливания металла (порошковая металлургия);
- 4) технологии металлографии (металловедения), технологии воздействия высокоэнергетических частиц, включая лазерное и плазменное излучение и т.д. [1–12].

Альтернативные (гибридные) технологии позволяют изготавливать как новые материалы и сплавы, имеющие высокую однородность микро- и макроструктуры, так и производство высокопрочного инструментального, штампового, литейного инструментов и т.д. посредством послойного напыления (атомизации) материала и формообразования заготовки для последующей обработки традиционными технологиями. Гибридные и аддитивные АF-технологии сближают использование различных методов послойного синтеза для получения детали из конструкционных и специальных сплавов, порошковых композитов и наноматериалов [1–12].

Оборудование для осуществления гибридных технологий (литейное и вакуумные печи, устройства термообработки и порошковой металлургии и др.), оснащенное системой диагностического управления с быстродействующим исполнительным устройством и высокоэффективными бесконтактными лазерными, волоконно-оптическими датчиками контроля и диагностики, позволит устранить потери материала до 20 % при распылении (атомизации и осаждении металла), наличие микропор в структуре материала и получать качественные заготовки типа ленты, цилиндра, кольца (труба), турбинных дисков диаметром до 1400 мм, изготовления инструмента и т.д. [1–12].

Основой гибридных технологий в УПС являются **традиционные** и **аддитивные** технологии – цифровые 3D-технологии, внедрение которых на основе цифровой 3D-модели (методом послойного добавления материала) вызвало развитие технологий 3D-печати с контролем и диагностикой параметров 3D-модели технологическими датчиками.

Алгоритм построения физической САD-модели [1–5, 15] позволяет контролировать различные параметры изделия, чтобы устранить брак и дефекты (неисправности), приводящие к отказам при изготовлении и ремонте деталей (изделий), готовых к эксплуатации в условиях РЖД [5–7, 20]. Анализ технологических особенностей применения 3D-печати для изготовления изделий (деталей) по цифровой модели показал, что в результате внедрения аддитивного технологического оборудования – 3D-принтеров, включая роторные 3D-принтерные технологические машины, появились новые технологии, вытесняющие традиционные технологии производства литейных деталей и штампового инструмента, деталей самолетов и ракет, НТТС и высокоскоростного подвижного состава и т.д. [1–14].

Термины **АF(АМ)-технологии**, обозначающие аддитивный технологический (АТ) процесс, охватывают синтез продукции на основе новых методов энергии формирования, фиксации и соединения слоев материала между собой склеиванием, спеканием, сплавлением, полимеризацией и т.д. в зависимости от конкретной технологии при формообразовании изделий (деталей) сложной геометрии для мелкосерийного производства [1–14]. Различные производители используют другие термины АТ, связанные не с разницей в технологическом процессе, а с вопросами патентования названий.

Области эффективного использования АТ зависят от сложности внедрения и сертификации деталей, конкурентоспособности и целесообразности производимых методом послойного синтеза деталей, имеющих сложную геометрию в мелкосерийном производстве в авиационной и железнодорожной промышленности, космической индустрии и т.д. Экономическая целесообразность АМ (АF)-технологий для производства и ремонта изделий (деталей) рабочих органов турбин ГТД, валов, а также для нанесения защитных и износостойких покрытий и т.д. [1–14] достигается перед традиционными технологиями за счет сокращения времени и стоимости при проведении вариантных исследований.

По гибридной технологии типа spray forming получают новые наноматериалы и сплавы с увеличенным содержанием лития и керамики, имеющие улучшенные (по сравнению с литейными сплавами) прочностные и износные характеристики при повышенных температурах и с заданным коэф-

фициентом термического расширения; композиционные материалы с керамической матричной основой (до 15 %) с повышенной жесткостью и сопротивлением износу; разнообразные покрытия с уникальными свойствами для применения в микроволновых устройствах и пленочных радиаторах, используемых в телекоммуникационных системах, аэрокосмической и оборонной промышленности, высокоскоростном составе [1, 9–11, 14]. В освоении гибридных технологий необходим выпуск порошковых материалов и оборудования для их производства (литейные, термообработки, порошковой металлургии, вакуумные печи) и внедрения технологии изготовления пресс-форм турбинных дисков диаметром до 1400 мм и металлорежущего инструмента из композитов и наноматериалов. Гибридные технологии в сочетании с методами интенсивной пластической деформации (ИПД), которые относятся к методам обработки материалов давлением (ОМД), позволяют получать новые конструкционные наноструктурные материалы с уникальными свойствами сильного измельчения зерна до наноразмеров. Для осуществления больших пластических деформаций используют традиционные технологические процессы ОМД: прокатка (рис. 2,а), кручение под давлением (рис. 2,б), ковка (рис. 2,в), равноканальное угловое прессование (рис. 3), волочение и др. Сущность этих методов заключается в многократной интенсивной пластической деформации (ИПД) сдвига обрабатываемых материалов для создания компактных сверхмелкозернистых материалов с размером зерен от 10 до 100 нм и получения массивных образцов с беспористой структурой материала, чего не удается достичь компактированием высокодисперсных нанопорошков.

В качестве технологического оборудования применяются прокатные станы, молоты, гидравлические и винтовые прессы с муфтовым приводом (МВП). Штамповка с кручением (см. рис. 2,б) характеризуется двумя силовыми факторами: усилием деформирования и крутящим моментом сопротивления скручиванию заготовки. Однако указанные силовые параметры при штамповке с кручением различных по размерам поковок не могут быть однозначно приведены к одному из этих параметров: усилию или крутящему моменту. Для выполнения указанных технологических процессов на МВП необходимо применить систему отключения муфты с управлением по работе деформирования [4–8].

Методом равноканального углового прессования (РКУП) получают массивные наноструктурные заготовки размерами до 85 мм и длиной до 300 мм, пригодные для использования в машиностроении. При реализации РКУП заготовка (см. рис. 3) неоднократно продавливается в специальной оснастке через два пересекающихся под углом 90° канала с одинаковыми поперечными сечениями (при комнатной или повышенной температурах, в зависимости от деформируемого материала). «Наноструктурность» материала получают за счет деформации сдвигом на гидравлических или винтовых прессах. Наноструктурные материалы вследствие очень малого размера зерен содержат в структуре большое количество границ зерен, которые играют определяющую роль в формировании их необычных физических и механических свойств.

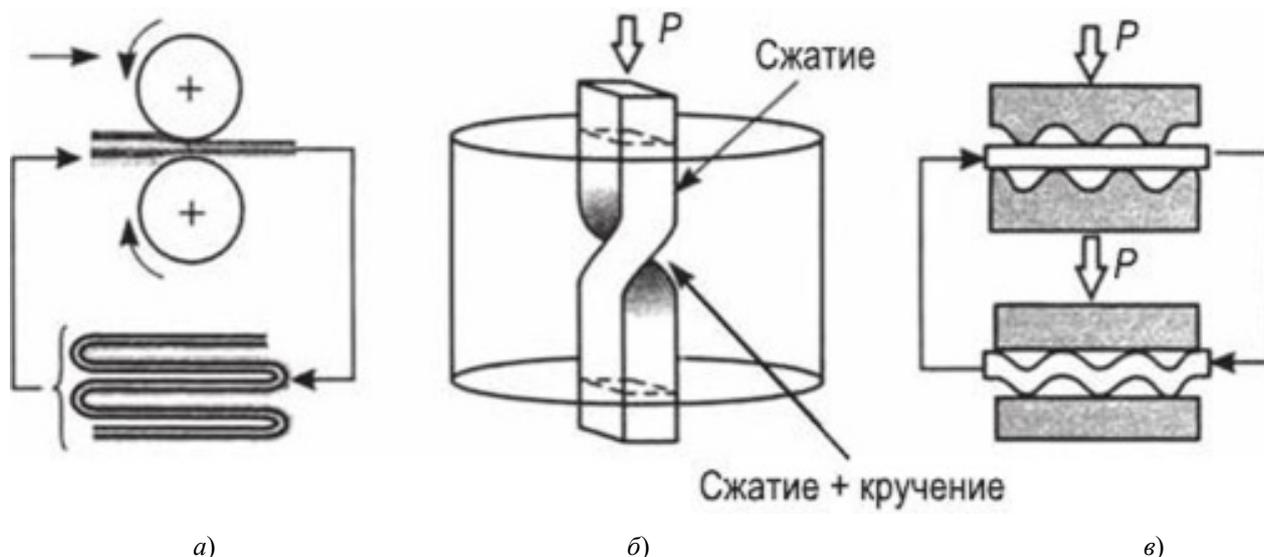


Рис. 2. Схемы методов интенсивной пластической деформации (ИПД):
а – прокатка; б – сжатие + кручение; в – ковка

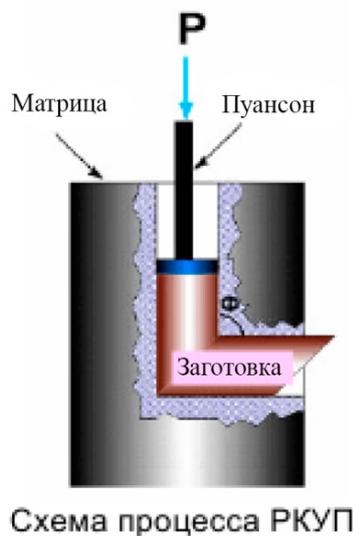


Рис. 3. Схема технологического процесса равноканального углового прессования (РКУП)

При «традиционных» заготовительных технологиях ОМД (прокатка материала на прокатных станах, ковка молотах и винтовых прессах и т.д.) повышение прочности материала сопровождается уменьшением его пластичности.

Наноструктурированные за счет интенсивной пластической деформации (ИПД) материалы имеют высокую прочность и уникальную пластичность. Для формирования наноструктур методом ИПД весьма важными являются не только число проходов, но и однородность исходного массива, равномерность распределения веществ, составляющих сплав, по объему исходного материала.

Гибридная технология типа spray forming позволяет получить качественный для ИПД наноматериал с использованием метода подшихтовки ультрадисперсных порошков в распыливаемый расплав основного, матричного металла, дающий возможность создания уникальных сплавов с равномерным включением в объемную структуру металла наночастиц различных материалов – металлов, включая редкоземельные, оксидов и пр. С помощью технологического оборудования (атомайзеров), реализующих рассмотренную технологию, получают различный по структуре порошок в зависимости от исходного металла.

Технологическая система распыления металлического порошка (атомайзер) является машиной для мало- и среднесерийного производства металлических заготовок и порошков и включает следующие основные элементы:

- 1) плавильная камера с донным сливом или поворотным тиглем;
- 2) распылительная камера, где струю расплавленного металла, вытекающую из плавильной камеры, разбивают на мелкие капли с помощью высокоскоростного потока аргона (воздуха) в зависимости от исходного металла и требований к форме частичек порошка;
- 3) диагностическая система управления, составными частями которой являются система контроля и диагностики, включая быстродействующий исполнительный рабочий орган;
- 4) бункер расходного материала;
- 5) станина машины.

Технологические машины производят металл в слитках (слив в изложницу) в виде порошковых материалов или в виде spray forming заготовки для последующей заготовительной технологии ОМД (прокатка, ковка, штамповка) и для гибридных технологий [4–8, 12–14]. Плавильно-распылительная машина (атомайзер) используется для физико-химических исследований, отработки технологии литья и механообработки материалов, получения партий порошковых металлов для аддитивных АФ-машин выращивания изделий (литейных форм) из металлических порошков, имеющих сферическую геометрию частиц. Дисперсность порошка варьируется от 10 до 100 мкм и может быть дополнительно разделена на отдельные фракции с помощью стандартных вибросит. Широкий спектр расплавляемых металлов включает пиррофорные и редкоземельные металлические сплавы, алюминиевые порошки с регулируемой атомизацией в воде для получения металлических гранул [2, 12–14].

Технологическое оборудование АМ (AF)-технологий, оснащенное диагностической системой управления и быстродействующим исполнительным рабочим органом, условно можно разделить на две группы: 1 – вид использования материала: 1.1 – порошковые композиты и наноматериалы; 1.2 – листовые (прутковые) композиции порошковых материалов; 2 – энергия для формообразования деталей: лазерное и плазменное излучения, электронный луч и ионное воздействие или их сочетания (ионно-лазерное, ионно-плазменное и др.), которое применяется для традиционных технологий [1, 12–14].

Технологии порошковых материалов на аддитивном АМ (AF)-оборудовании основаны на следующих основных принципах:

- 1) склеивание;
- 2) спекание с использованием различных концентрированных видов энергии и т.д.

1. Склеивание порошкового материала. В 3D-принтерах происходит равномерное нанесение слоя порошка на плоскость построения с его последующим выборочным склеиванием посредством нанесения связующего вещества печатной головкой. Поэтапное нанесение равномерного слоя порошка и его склеивание продолжается до полного построения детали. В качестве материала построения используют порошки металлические, пластиковые и силикаты, для печати литейных форм при изготовлении металлических отливок любой сложности и конфигурации. По завершении 3D-печати с использованием металлического порошка в качестве материала построения объект помещается в печь до полного отвердевания связующего вещества, затем он извлекается и очищается. В следующей печи по специальной технологии он пропитывается порошковой бронзой для получения готового изделия с высокими механическими свойствами. Также применяется технология (SHS) для изготовления детали термопечатающей головкой 3-D принтера вместо лазерной технологической системы.

2. Спекание порошкового материала. Лазерные аддитивные технологии можно разделить на две группы:

- 1) технологии SLM;
- 2) технологии LMD, которые являются альтернативой методу склеивания порошка связующим веществом и имеет схожие технологии.

В качестве материала для построения детали используются порошковые материалы: полистирол, керамика, стекло, сталь, титан, алюминий и другие металлические сплавы и наноматериалы.

1. Технологии типа **SLM**-селективное лазерное сплавление с использованием ванны расплава (см. рис. 2, 3) – полное расплавление порошка лазером в отличие от спекания включают технологии **SLS** и **SLA**, **DMLS** и др. Технологию **DMLS** – лазерная SLS-технология с применением металлических порошков – отличает высокая точность и качество построения сложных изделий с полостями внутри.

2. Технологии типа **LMD**-прямое лазерное осаждение (лазерное выращивание) с использованием прямой подачи порошка или проволоки непосредственно в место спекания включают такие аддитивные технологии, как **DMD**, **LENS**, **DM** и **MJS**, позволяющие вести построение деталей с большими скоростями. Анализ проведенных исследований порошковых материалов (сталь, никель, алюминий, титан и т.д.), попадающих в луч мощного лазера для осаждения в расплавленном виде на плоскость построения, показал пониженную точность и ограниченную сложность выращиваемых деталей.

Анализ применения технологий SLM и LMD для изготовления одной и той же детали для крепления двигателя под крыло самолета Airbus A320, устойчивой к высоким температурным, химическим и механическим воздействиям, показал различие как в структуре полученного материала и прочности на разрыв и сжатие, так и в следующих параметрах: время и скорость построения; дополнительная обработка; уровень и качество детализации. Внедрение технология SLM показало высокий уровень и качество детали, но низкий уровень времени ($t = 40$ ч) и скорости построения ($v = 15 \text{ мм}^3/\text{с}$), по сравнению с технологией LMD ($t = 14$ ч; $v = 146,7 \text{ мм}^3/\text{с}$), в ходе построения отсутствовали некоторые отверстия (требовалась дополнительная механическая обработка). Деталь изготавливается традиционными технологиями заготовительного производства (технология литья) и ОМР. Эффективность использования AF-технологий в машиностроении зависит от сложности внедрения и сертификации деталей, перспективности и конкурентоспособности (по стоимости), целесообразности внедрения оборудования послойного лазерного синтеза металлических изделий в мелко-

серийное (серийное) производство деталей сложной геометрии в авиационной и железнодорожной промышленности, космической индустрии и т.д. Технологии листовых порошковых материалов на АФ-оборудовании в серийном производстве пластмассовых изделий должны обеспечивать высокую стойкость пресс-форм и получать любую форму и размеры поверхностей, включая закрытые полости, что вызывает необходимость использования металлических пресс-форм из качественных сталей. Для получения изделий высокого качества необходимо обеспечить равномерный режим охлаждения пластмассы в пресс-форме: охлаждающие каналы должны повторять формы изготавливаемых изделий, что невозможно сделать с помощью традиционных технологий.

Алгоритм АФ-технологии изготовления пресс-форм (рис. 4) с использованием листовых порошковых материалов: 1 – проектирование изделие (пресс-форма) на компьютере; 2 – форма и размеры охлаждающих каналов соответствуют теоретическим расчетам, гарантирующим высокое качество изготавливаемого изделия; 3 – по результатам компьютерного проектирования каждый слой изготавливается с помощью лазерной установки из листового материала требуемой марки; 4 – изготовленные из листового металла слои пресс-формы, собираются, сжимаются с помощью специальных устройств; 5 – пакет листовых слоев сваривается диффузионной сваркой, приобретая монолитную конструкцию, соответствующую по прочности цельному изделию; 6 – обработка поверхностей традиционными технологиями ОМР и ТО. Использование АТ сокращает время проектирования изделия путем цифрового конструирования охлаждающих каналов любой формы и размеров. Процесс изготовления изделий (деталей) в таких пресс-формах можно полностью автоматизировать и обеспечить качественные изделия. Особенностью гибких технологий, использующих лучевой источник тепловой энергии, является необходимость контроля электронно-лучевой энергии, плазменного и лазерного излучения, используемой в технологических АФ-машинах, для полного расплавления порошковых композитов и наноматериалов (ЕВМ-технология) с контролем тепловой энергии и параметров металлического порошка направленным пучком энергии электронов в отличие от спекания лазером и испарения плазмой.



Рис. 4. Алгоритм создания пресс-форм из листовых порошковых материалов

Низкотемпературная высокочастотная плазма (*плазменные технологии*) обладает высокой скоростью протекания процессов и используется в качестве источника энергии в технологиях традиционных и аддитивных:

- 1) в АF-технологиях для плавления композитных порошков и наноматериалов;
- 2) для получения нанокристаллических материалов применяют плазмохимический синтез;
- 3) плазменного напыления (нанесения) на поверхность деталей упрочняющих, термостойких, антикоррозионных, защитных покрытий, восстанавливающих изношенные поверхности деталей и повышающих надежность машин;
- 4) плазменной резки материала (до 250 мм);
- 5) нагрев заготовки низкотемпературной высокочастотной плазмой (факельным разрядом – ФР) традиционными технологиями ОМД;
- 6) для изготовления отверстий в материале заготовки. Для контроля температуры ФР применяется новое инвариантное волоконно-оптическое устройство контроля температуры типа ИРТ-3, ИРТ-4 [3].

Напыления в зависимости от вида концентрированной энергии различают:

- 1) плазменные;
- 2) электродуговые;
- 3) лазерные;
- 4) электронно-лучевое технологии напыления;
- 5) сочетание указанных видов концентрации энергий для нагрева, обеспечивающий равномерное осаждение на поверхность изделия тонкого слоя заданного вещества для придания изделию дополнительной прочности, электропроводности, износоустойчивости в зависимости от вида и геометрии изделия, условий его эксплуатации, вида материала изделия и его массы и т.д.

Управление параметрами лазерного луча как источника нагрева материалов позволило разработать методы поверхностной лазерной обработки с контролем и диагностикой качества структуры поверхностного слоя: твердость и износостойкость, шероховатость и геометрические размеры, «транспортировку» лазерного излучения в труднодоступные места и производить обработку в автоматизированном режиме для изготовления заготовки (детали) резкой, пробивкой, сваркой из листов металла, композита, полимера, керамики малыми партиями в многономенклатурном производстве машиностроения.

В гибридной технологии по САD-модели энергия установки с лазерным излучением мощностью от 1 до 5 кВт позволяет получать технологическую, инструментальную оснастку литейных и штамповых пресс-форм, порошки и наноматериалы и различные композитные сплавы широкого спектра, удалять облой, обрабатывать заготовки в размер по посадочным поверхностям, производить термообработку и получать качественные изделия из материалов с увеличенным содержанием лития и керамики [1–3, 9–12].

В гибких технологиях для автоматического контроля и диагностики размеров, линейных перемещений, качества материалов и изделий и другого применяют контрольно-измерительную оптоволоконную, лазерную технологию. Для устранения брака и дефектов, приводящих к отказам, применяются системы компьютерной томографии технологических параметров, позволяющие получить изображение любого сечения объекта 3-мерной модели в целом, которая может быть сопоставлена с исходной САD-моделью и использована в качестве контрольно-диагностической машины с разрешением до 1 мкм и точностью измерений 10 мкм.

Заключение

1. Анализ методов для получения наноматериалов показал, что в зависимости от того, какой используется способ получения нанокристаллических материалов: нанокристаллизация аморфных сплавов, плазменное, лазерное, электровзрывное и термическое испарение, механическое легирование в высокоэнергетических мельницах, компактирование нанопорошка, интенсивная пластическая деформация (ИПД) и т.д., формируется различная структура наноматериалов, влияющая на качество, гибкость и скорость внедрения новых технологий.

2. Альтернативные (гибридные) технологии АF(АМ) и синтез аддитивных и традиционных технологических процессов порошковых наноматериалов и композитов, спеченных порошковых заготовок и другие технологии, позволяют сократить расход материалов, энергии за счет совершен-

ствования технологических процессов и максимального приближения форм и размеров заготовок к готовым деталям, уменьшения объемов механической обработки на основе контроля и диагностического управления потоками энергии электронного луча, лазерного излучения, плазменного и ионного воздействия.

3. Формообразование деталей в машиностроении отличается выбором материалов, технологией и энергией, которой необходимо управлять по цифровой модели для изготовления качественной детали любой сложности с контролем и диагностикой параметров датчиками и устройствами промышленных томографических систем.

4. Области эффективного использования АТ зависят от сложности внедрения и сертификации деталей, конкурентоспособности и целесообразности производимых методом послойного синтеза деталей, имеющих сложную геометрию в мелкосерийном производстве в авиационной и железнодорожной промышленности, космической индустрии, медицине и т.д.

Библиографический список

1. *Перевертов, В. П.* Качество управления альтернативными технологиями формообразования деталей в «умных» производственных системах / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, И. Ю. Семочкина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 102–110.
2. *Перевертов, В. П.* Материаловедение : конспект лекций / В. П. Перевертов. – Самара : Изд-во СамГУПС, 2016. – 136 с.
3. *Перевертов, В. П.* Технологии конструкционных материалов. Литейные и порошковые технологии. Лазерные технологии и обработки материалов резанием : учеб. пособие / В. П. Перевертов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара : Изд-во СамГУПС, 2018. – 192 с.
4. *Перевертов, В. П.* Технологии конструкционных материалов. Технологии обработки материалов давлением : учеб. пособие / В. П. Перевертов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара : Изд-во СамГУПС, 2018. – 154 с.
5. *Капита, В. И.* Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В. И. Капита. – Москва : Лидер М, 2008. – 179 с.
6. Металлические порошки и порошковые материалы / Б. Н. Бабич, Е. В. Вершинина, В. А. Глебов, В. Л. Калихман, Ю. В. Левинский, В. Ю. Лопатин, В. Г. Люлько, С. С. Набойченко, И. А. Тимофеев, В. А. Фальковский, О. Н. Фомина ; под ред. Ю. В. Левинского. – Москва : ЭКОМЕТ, 2005. – 289 с.
7. *Перевертов, В. П.* Качество управления гибкими технологиями : монография / В. П. Перевертов. – Самара : СамГУПС, 2019. – 270 с.
8. *Перевертов, В. П.* Управление кузнечными машинами в ГПС / В. П. Перевертов, Ю. А. Бочаров, М. Е. Маркушин. – Куйбышев, 1987. – 160 с.
9. *Перевертов, В. П.* Качество продукции и услуг РЖД в сочетании с качеством управления / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 116–120.
10. *Перевертов, В. П.* Система диагностирования и технического обслуживания НТТС и ПС в условиях РЖД / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 93–95.
11. *Перевертов, В. П.* К вопросу выбора инновационных технологий формообразования деталей в умных производственных системах / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 42–45.
12. *Перевертов, В. П.* Технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3 (11). – С. 69–79.
13. *Мишанов, Р. О.* Выбор электрических параметров интегральных микросхем специального назначения для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 43–54.
14. *Перевертов, В. П.* Динамическое моделирование быстродействующего пьезогидравлического исполнительного органа муфтового винтового пресса / В. П. Перевертов, Е. А. Кузина, Г. П. Разживина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 49–58.

References

1. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Semochkina I. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 102–110. [In Russian]
2. Perevertov V. P. *Materialovedenie: konspekt lektsiy* [Materials science: lecture notes]. Samara: Izd-vo SamGUPS, 2016, 136 p. [In Russian]

3. Perevertov V. P. *Tekhnologii konstruksionnykh materialov. Liteynye i poroshkovye tekhnologii. Lazernye tekhnologii i obrabotki materialov rezaniem: ucheb. posobie* [Technologies of construction materials. Foundry and powder technologies. Laser technologies and material processing by cutting: tutorial]. 2nd ed., rev. and suppl. Samara: Izd-vo SamGUPS, 2018, 192 p. [In Russian]
4. Perevertov V. P. *Tekhnologii konstruksionnykh materialov. Tekhnologii obrabotki materialov davleniem: ucheb. posobie* [Technologies of construction materials. Technologies for processing materials by pressure: tutorial]. 2nd ed., rev. and suppl. Samara: Izd-vo SamGUPS, 2018, 154 p. [In Russian]
5. Kapita V. I. *Plazmennye pokrytiya s nanokristallicheskoj i amorfnoy strukturoy* [Plasma coatings with nanocrystalline and amorphous structure]. Moscow: Lider M, 2008, 179 p. [In Russian]
6. Babich B. N., Vershinina E. V., Glebov V. A., Kalikhman V. L., Levinskiy Yu. V., Lopatin V. Yu., Lyul'ko V. G., Naboychenko S. S., Timofeev I. A., Fal'kovskiy V. A., Fomina O. N. *Metallicheskie poroshki i poroshkovye materialy* [Metal powders and powder materials]. Moscow: EKOMET, 2005, 289 p. [In Russian]
7. Perevertov V. P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya* [Quality of flexible technology management: monograph]. Samara: SamGUPS, 2019, 270 p. [In Russian]
8. Perevertov V. P., Bocharov Yu. A., Markushin M. E. *Upravlenie kuznechnymi mashinami v GPS* [Managing blacksmithing machines in GPS]. Kuybyshev, 1987, 160 p. [In Russian]
9. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 116–120. [In Russian]
10. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 93–95. [In Russian]
11. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 42–45. [In Russian]
12. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 3 (11), pp. 69–79. [In Russian]
13. Mishanov R. O., Piganov M. N., Perevertov V. P. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 43–54. [In Russian]
14. Perevertov V. P., Kuzina E. A., Razzhivina G. P. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4 (24), pp. 49–58. [In Russian]

Перевертов Валерий Петрович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра наземных
транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2 В)
E-mail: vpervertov@yandex.ru

Андрончев Иван Константинович

доктор технических наук, профессор,
кафедра электрического транспорта,
ректор Самарского государственного
университета путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2 В)
E-mail: rektoratSamgups@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Perevertov Valeriy Petrovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of ground transportation
and technology tools,
Samara State University of Railway Transport
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Andronchev Ivan Constantinovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of electric transport,
rector of Samara State University
of Railway Transport
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratjevich

doctor of technical science, professor
honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of design
and production of radio equipment,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Перевертов, В. П. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 85–95. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-9.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 004

DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-10

В. Р. Роганов, О. А. Кувшинова, Н. С. Есимова, Е. А. Асмолова, Л. А. Тюрина

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭРГАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ «АВИАЦИОННЫЙ ТРЕНАЖЕР» ЗА СЧЕТ ДОБАВЛЕНИЯ УЧЕБНЫХ СИТУАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С РЕШЕНИЕМ ЗАДАЧ САМОЛЕТОВОЖДЕНИЯ

V. R. Roganov, O. A. Kuvshinova, N. S. Esimova, E. A. Asmolova, L. A. Tyurina

IMPROVEMENT OF ERGATIC SOFTWARE AND TECHNICAL COMPLEXES “AIRCRAFT SIMULATOR” BY ADDING TRAINING SITUATIONS RELATED TO THE SOLUTION OF NAVIGATION TASKS

Аннотация. Проведен анализ эргатического программно-технического комплекса, получившего название «авиационный тренажер», используемого сейчас для профессиональной подготовки летчиков, для наработки навыков пилотирования летательного аппарата во время особых случаев в полете. Такой традиционный подход является следствием возможностей программно-технических средств, которые использовались в конце XX в. В частности, обучение пилотированию летательного аппарата подразумевает и обучение вязальной посадке на модель ВПП абстрактного аэродрома с визуальным наблюдением прилегающей местности. Размер модели полетов, пролетая над которым, летчик мог визуально ориентироваться, составляет не более чем 15×15 км. В центре такого района находится центр модели ВПП. Однако современное состояние науки и техники позволяет расширить мо-

Abstract. An analysis is made of an ergatic software and hardware complex called the “flight simulator”, which is now being used to train pilots in the skills of piloting an aircraft during special cases in flight. This traditional approach is a consequence of the capabilities of software and hardware that were used at the end of the 20th century. In particular, training in piloting an aircraft also involves training in knitting landing on the runway model of an abstract aerodrome with visual observation of the surrounding area. The size of the flight model flying over which the pilot could visually navigate is no more than 15×15 km. At the center of such an area is the center of the runway model. However, the current state of science and technology allows us to expand the flight region model to a size of $1,500 \times 1,500$ km, including providing pilots with training in solving aircraft navigation problems with visual orientation using reference objects models visible through the glazing of the flight simulator cabin, on the screen of the

дель района полетов до размера 1500×1500 км, обеспечить летчиков обучением решению задач самолетовождения с визуальной ориентацией по моделям реперных объектов, видимых через остекление кабины авиационного тренажера, на экране имитатора тепловизора и на экране имитатора радиолокатора. При этом сохраняется возможность определения места нахождения модели летательного аппарата в модели внешней среды по показаниям имитаторов радиотехнических средств самолетовождения и контроля выхода в/на поворотный пункт маршрута методом счисления пути. Рассматриваются основные требования к отдельным узлам авиационного тренажера, позволяющие расширить число учебных ситуаций, добавив решение задач самолетовождения с визуальным контролем пролета моделей реперных объектов в поворотных пунктах маршрута.

Ключевые слова: авиационный тренажер, пилотирование летательного аппарата, самолетовождение, модель внешней среды.

imager of the imager and on the screen of the simulator of the radar. At the same time, it remains possible to determine the location of the model of the aircraft in the model of the external environment according to the testimony of simulators of radio engineering means of aircraft and keeping control of the exit to \ to the turning point of the route by dead reckoning. The article discusses the basic requirements for individual units of the flight simulator to expand the number of training situations by adding a solution to the problems of self-driving with visual control of the passage of models of reference objects in the turning points of the route.

Keywords: flight simulator, piloting of an aircraft, aircraft navigation, model of the environment.

Введение

Современное развитие аппаратно-программных комплексов машинного синтеза позволяет в реальном масштабе времени синтезировать на экране монитора изображения местности, по качеству приближенные к изображениям на экране телевизора, полученного с использованием видеокамер [1]. Определенная эйфория от полученных результатов часто позволяет ошибочно интерпретировать полученные результаты как решение задач синтеза и моделирования объемного изображения [2]. Такая трактовка обычно опирается на результаты, полученные при рассмотрении на экране монитора «неплоского» изображения, полученного за счет обработки светотени (рис. 1), или при рассмотрении движущихся моделей трехмерных объектов, грани которых освещены с учетом правил машинной графики (например, когда на экране перемещается модель куба, или написанное «объемным» шрифтом слово). Системы моделирования трехмерного изображения используются в различных отраслях народного хозяйства: для обучения водителей транспортных средств, при улучшении условий проведения операций с использованием эндоскопических стоек и в других случаях [3]. В дальнейшем будем рассматривать авиационные тренажеры (рис. 2), позволяющие на земле обучить летчиков профессиональным навыкам пилотирования летательного аппарата и частично решению навигационных задач [4].



Рис. 1. Пример «неплоского изображения»

Основная часть

Для получения модели трехмерной внешней среды вокруг кабины тренажера вначале на плоском экране синтезируется видеоряд из 2D-проекций части модели 3D-внешней среды, попавшей в камеру наблюдения (рис. 3).



Рис. 2. Кабина авиационного тренажера устройством индикации с «широким зрачком» [5]



Рис. 3. Возможное положение камеры наблюдения в модели внешней среды

Синтезируют на плоском экране 2D-проекцию части 3D-внешней среды в авиационных тренажерах специализированные программно-технические системы машинного синтеза [6]. Длительное время считалось, что достаточно подключить к такому экрану устройство индикации синтеза 3D-изображения и такую систему можно использовать как «Имитатор визуальной обстановки» или как комплекс, позволяющий обучать летчика визуальной посадке на модель ВПП [7].

Технология получения 3D-изображения следующая. На плоском экране синтезируется с интервалом не более 120 мсек 2D-проекция части трехмерной модели внешней среды. Далее используют одну из двух возможных схем с оптическими устройствами.

Условно первой системой назовем систему со стереочками. Обычно это два экрана, каждый из которых подключен к своей специализированной программно-технической системе машинного синтеза. Один синтезирует изображение для левого глаза, один – для правого глаза. Преимущество такой системы в том, что подготовленный наблюдатель видит 3D-изображение в любом случае, если телесные углы камер наблюдения совпадают с углами между глазом наблюдателя и соответствующим экраном, на котором синтезируется соответствующее изображение. Недостаток в том, что существует интервал времени, в течение которого зрительный аппарат конкретного человека учится видеть 3D-изображение моделей объектов с качеством, позволяющим человеку визуально определять расстояние до выбранной модели. Как правило, любой человек, надев стереочки, сразу видит на экранах резкое, а не расплывчатое изображение (среди людей есть исключения, когда человек, начав рассматривать изображения через стереочки, может потерять ориентацию в пространстве или получить сильную головную боль после сеанса такой работы). Кроме того, не все сразу могут визуально определять расстояние до рассматриваемых моделей так же, как в реальной жизни они визуально определяют расстояние до выбранных объектов. Эксперименты, в которых участвовали

авторы статьи при проведении НИОКР «Исследование и оптимизация технологий изготовления светоделительных пластин и сферических зеркал, для одноканальных и многоканальных безочковых индикаторов псевдообъемного изображения с узким зрачком» (государственный контракт №8009р/8265 от 30.04.2010) (1 и 2 этапы) между ООО «Видео3» и Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», показали, что интервал обучения зрительного аппарата конкретного человека видеть 3D-модель и визуально определять расстояние до нее может длиться до 5 месяцев, при ежедневной работе с такой системой не менее 20 мин в день. При этом все исследователи сразу видели четкое изображение, но не могли точно определять расстояние до видимых моделей.

Итак, при обучении зрительного аппарата человека видеть 3D-модель при использовании систем со стереочками могут появиться негативные эффекты:

- головная боль;
- кратковременная потеря ориентации в пространстве во время первых сеансов работы с такими системами, что наблюдалось у двух исследователей (при общем числе исследователей 78 человек).

У исследователей, работавших с такими системами, через месяц негативные эффекты, если они были раньше, пропадали, что объясняется обучением зрительного аппарата человека видеть 3D-модель. У большинства исследователей не наблюдалось негативных эффектов при работе с системами со стереочками. Переход от телевизионных экранов с чересстрочной разверткой к телевизионным экранам с прогрессивной разверткой и увеличение числа пикселей на единицу площади телевизионного экрана улучшают характеристики систем со стереочками и снижают процент негативных эффектов.

Вторая система, используемая в авиационном тренажере, – это безочковые системы моделирования 3D-изображения, когда между плоским экраном и глазом человека размещается коллиматор (такая система воздействует на аккомодацию и конвергенцию зрительного аппарата человека). Для наблюдения 3D-изображения при использовании таких систем, кроме соответствия углов пирамиды видимости углам обзора используемой системы моделирования 3D-изображения, для активизации аккомодации и конвергенции зрительного аппарата человека наблюдатель должен быть подвижен или в кадре должны быть подвижные объекты.

Обе рассматриваемые системы моделирования 3D-изображения относятся к псевдообъемным системам моделирования трехмерного изображения. Трехмерная модель создается в сознании человека за счет целенаправленного воздействия специальной оптики на зрительный аппарат человека специальных изображений, являющихся 2D-проекциями моделей трехмерной внешней среды на плоскость экрана (экранов). Все мы разные, и это подтверждается результатами проведенных исследований, но указанные особенности зрения человека позволяют всем людям видеть модель 3D-изображения с качеством, достаточным для тренировки глазомера, но может быть интервал обучения человека видеть 3D-изображение. При использовании безочковых систем из всех исследователей такой был один.

В XX в. псевдообъемные системы были основными в имитаторах визуальной обстановки авиационных тренажеров. Их эффективность подтверждена способностью обучать летчиков сложному процессу визуальной посадке на модель ВПП, в том числе на укороченную модель ВПП палубы авианосца. Ранее считалось, что к недостаткам безочковых систем моделирования 3D-изображения относятся [8, 9]:

- условия наблюдения 3D-изображения только при подвижном наблюдателе;
- что дистанция между глазом наблюдателя и ближайшей видимой трехмерной моделью – 80 м;
- что эффект наблюдения трехмерной модели возможен только в полной темноте, так как из-за поглощения и отражения в оптической системе синтезируемая 3D-модель тусклая.

Однако, как показали результаты эксперимента, эти предположения частично ошибочны.

Безочковые системы синтеза 3D-моделей делятся на два класса: системы с «узким зрачком» и системы с «широким зрачком». При использовании систем с «узким зрачком» существует незначительная область пространства (рис. 4), в которой должны находиться глаза наблюдателя, и такой объем позволяет одному летчику комфортно наблюдать 3D-модель. В системах с «широким зрачком» в такую область наблюдения 3D-изображения помещается кабина широкофюзеляжного самолета (см. рис. 2). В системах с «узким зрачком» в область наблюдения 3D-изображения помещается

голова наблюдателя (рис. 5). Обычно один безочковый индикатор моделирует для человека 3D-модель внешнего пространства в углах обзора 40° по горизонтали и 30° по вертикали. Для расширения углов обзора устанавливается несколько таких индикаторов (рис. 2, 5). В частности, на рис. 5 имеется три индикатора, которые в сумме дают углы обзора 120° по горизонтали и 30° по вертикали.

Все рассматриваемые системы синтеза 3D-изображения позволяют подготовленному человеку визуально оценивать расстояние до наблюдаемых объектов. Все рассматриваемые системы являются псевдообъемными. В отличие от истинно объемных систем (на базе вращающегося экрана) в этих системах используется видеоряд из 2D-проекций, а зрительный аппарат человека достраивает его до 3D-модели.

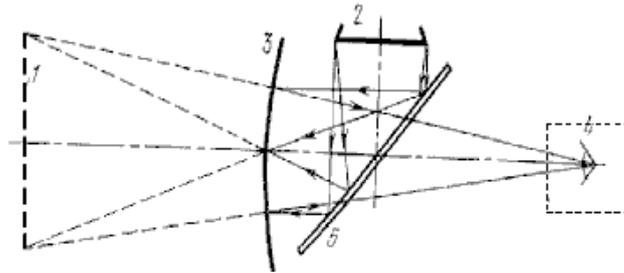


Рис. 4. Схема псевдообъемного индикатора с «узким» зрачком на базе зеркального коллиматора:
 1 – мнимый экран; 2 – телевизионный экран, на котором синтезируются 2D-проекции 3D-объектов;
 3 – вогнутое сферическое зеркало; 4 – место расположения глаза человека-наблюдателя;
 5 – светоделительная пластина



Рис. 5. Трехканальное устройство индикации ОКУ производства ОАО ПКБМ с «узким зрачком», установленное на пилотажном тренажере

При исследовании псевдообъемных индикаторов с «узким зрачком» типа ОКУ производства НПП «ЭРА» или РЭЛЛИ, ЭЛЬВИРА, СВЕТЛАНА/15/М производства ООО «Видео3» были обнаружены следующие эффекты:

- существует объем пространства перед указанными индикаторами, при нахождении в котором глаз наблюдателя видит трехмерное изображение моделей виртуального пространства, рассматривая двухмерные, изменяемые модели, которые высвечиваются на экране формирования промежуточного изображения;
- изображение оказывается достаточно ярким, чтобы наблюдатель мог видеть его при дневном освещении;
- псевдообъемное изображение получается слегка «размытым», но достаточно четким, и это не сказывается на возможности использования таких систем в авиационных тренажерах, в эндоскопических стойках и в других случаях, когда необходимо моделировать 3D-изображение объектов для человека;

– между наблюдателем и самой ближайшей моделью виртуального пространства имеется «зона стенки окна», оцениваемой нами по результатам экспериментов как не более 8 м, в то время как по литературным данным это расстояние оценивается не менее чем 80 м [1, 3].

Анализ технических решений показывает, что имеются достаточно хорошие решения задачи моделирования 3D-изображения модели внешней среды, которые можно классифицировать (рис. 6). Это явилось следствием разработки авиационных тренажеров как обучающих систем для привития летчикам профессиональных навыков пилотирования летательных аппаратов, когда от таких систем требовалось синтезировать 3D-изображение модели ВПП на этапе обучения визуальной посадки летательного аппарата.

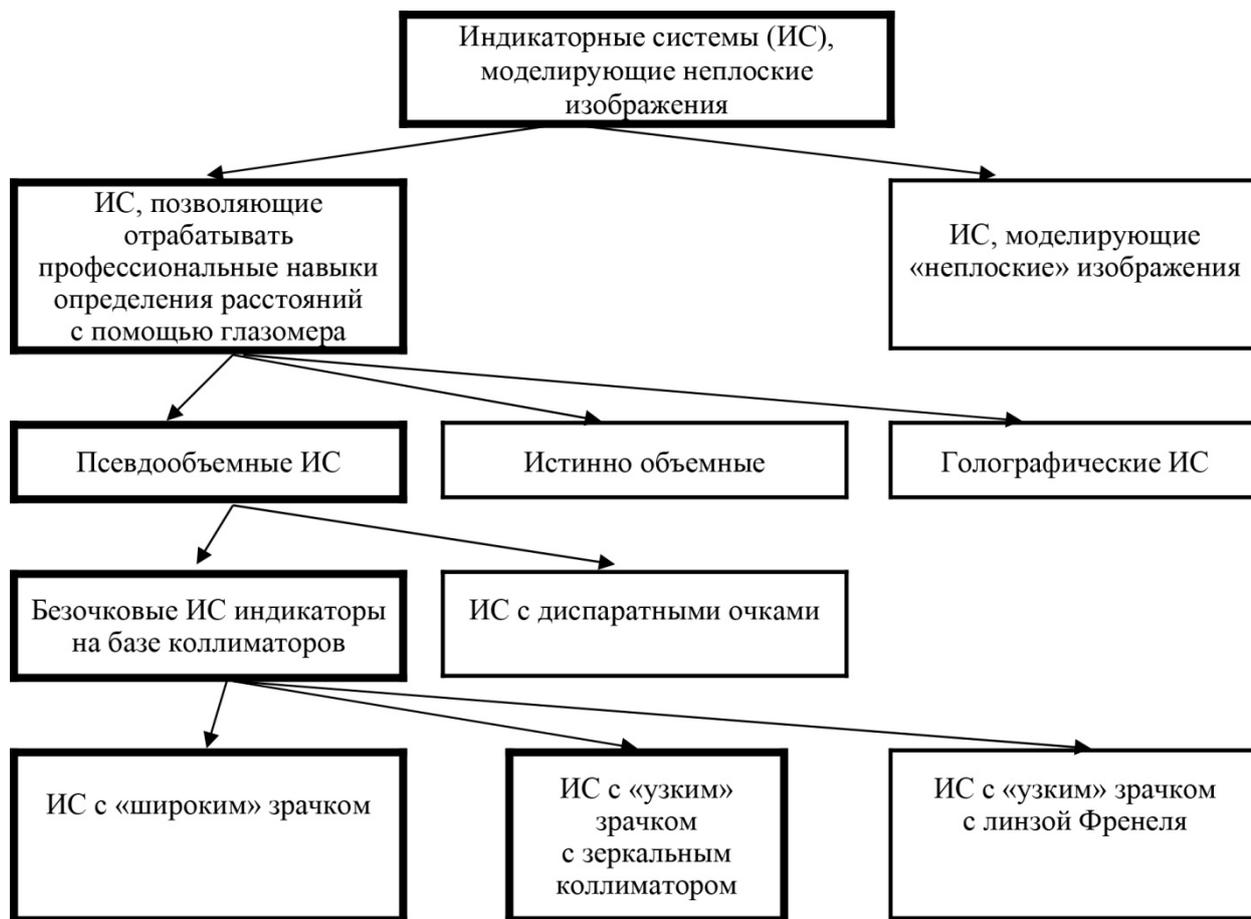


Рис. 6. Классификация индикаторных систем, моделирующих неплоские изображения (выделены системы, используемые в авиационном тренажеростроении)

В то же время летчик, управляя реальным летательным аппаратом, решает задачи пилотирования и навигации. В настоящее время решение навигационных задач в максимальном объеме летчик принимает только при полете над моделью аэродрома. Почти все известные пилотажные и комплексные авиационные тренажеры для этого моделируют узнаваемую модель земной поверхности размером 15×15 км, в центре которой находится модель основной ВПП конкретного аэродрома. При этом бывшая долгое время лидером мирового авиационного тренажеростроения канадская фирма CAE разрабатывает имитаторы визуальной обстановки, теоретически позволяющие моделировать район полетов размером 1500×1500 км. Для целей навигации необходимо решить задачи создания модели реального участка местности с размещенными в ней моделями реперных объектов, такая модель называется сценой визуализации. Раньше решение такой задачи сдерживалось недостаточным объемом памяти и производительностью используемых программно-технических систем, на базе которых разрабатывались компьютерные генераторы изображения. Сейчас эти ограничения сняты. Остались нерешенными следующие задачи.

Первая из них – какие требования должны предъявляться к сцене визуализации. В ней должны находиться модели реперных объектов M_j^V , которые могут быть видны в имитатор визуальной обстановки любого типа, и при необходимости летчики по ним должны решать все задачи навигации:

$$P_{t_i}^V = \sum_{j=1}^{N_{t_i}^V} I^V(M_j^V),$$

где $P_{t_i}^V$ – определенное летчиком при полете на авиационном тренажере место модели летательного аппарата в модели внешней среды по информации от имитатора визуальной обстановки; $I^V(M_j^V)$ – информация о положении модели летательного аппарата в модели внешней среды, полученная летчиком при ориентации по визуально наблюдаемой j -й модели M_j^V через остекление кабины авиационного тренажера; $N_{t_i}^V$ – число реперных объектов, по которым в момент времени t_i видимых через имитатор визуальной обстановки.

Вторая – задачи навигации в полете на реальном летательном аппарате могут решаться не только при наблюдении за реперными объектами через остекление кабины, но при наблюдении за реперными объектами через тепловизор M_j^Q и радиолокатор M_j^R :

$$P_{t_i}^Q = \sum_{j=1}^{N_{t_i}^Q} I^Q(M_j^Q),$$

где $P_{t_i}^Q$ – определенное летчиком при полете на авиационном тренажере место модели летательного аппарата в модели внешней среды по информации от имитатора тепловизора; $I^Q(M_j^Q)$ – информация о положении модели летательного аппарата в модели внешней среды, полученная летчиком при ориентации по визуально наблюдаемой j -й модели M_j^Q на экране имитатора тепловизора; $N_{t_i}^Q$ – число реперных объектов, по которым в момент времени t_i видимых через имитатор тепловизора:

$$P_{t_i}^R = \sum_{j=1}^{N_{t_i}^R} I^R(M_j^R),$$

где $P_{t_i}^R$ – определенное летчиком при полете на авиационном тренажере место модели летательного аппарата в модели внешней среды по информации от имитатора радиолокатора; $I^R(M_j^R)$ – информация о положении модели летательного аппарата в модели внешней среды, полученная летчиком при ориентации по визуально наблюдаемой j -й модели M_j^R на экране имитатора радиолокатора; $N_{t_i}^R$ – число реперных объектов, по которым в момент времени t_i видимых через имитатор радиолокатора.

Третья задача навигации может решаться с помощью радиотехнических средств самолето-вождения (радиокомпаса, радиостанции ближней навигации и т.д.):

$$P_{t_i} = F_k(I_k),$$

где P_{t_i} – определенное летчиком при полете на авиационном тренажере место модели летательного аппарата в модели внешней среды по информации $F_k(I_k)$ от k -го имитатора радиолокатора.

При разработке разных имитаторов авиационного тренажера, моделирующих для летчика модель внешней среды с возможностью решения задач навигации: имитатор визуальной обстановки, имитатор тепловизора и имитатор радиолокатора – разрабатываются три сцены визуализации: сцена визуализации для имитатора визуальной обстановки; сцена визуализации для имитатора тепловизора; сцена визуализации для имитатора радиолокатора. Учитывая, что летчик во время полета до 90 % информации получает от зрительного анализатора, и то, что полной модели создать невозможно, при разработке сцен визуализаций необходимо учесть, что число моделей реперных объек-

тов, расположенных в соответствующих сценах, являются подмножеством числа реальных объектов, которые расположены в районе местности, выбранном в качестве прототипа сцены визуализации. При этом необходимо учесть, что количество моделей реперных объектов по всей сцене визуализации должно быть достаточно для решения навигационных задач:

$$N_S^V = \frac{N^V}{S^V},$$

$$N_S^V \geq K_S^V,$$

где N_S^V – число моделей реперных объектов сцены визуализации имитатора визуальной обстановки на единицу площади; N^V – число моделей реперных объектов в сцене визуализации имитатора визуальной обстановки; K_S^V – минимальное число моделей реперных объектов на единицу площади сцены имитатора визуальной обстановки, позволяющее решать задачи навигации:

$$N_S^Q = \frac{N^Q}{S^Q},$$

$$N_S^Q \geq K_S^Q,$$

где N_S^Q – число моделей реперных объектов сцены визуализации имитатора тепловизора на единицу площади; N^Q – число моделей реперных объектов в сцене визуализации имитатора тепловизора; K_S^Q – минимальное число моделей реперных объектов на единицу площади сцены имитатора тепловизора, позволяющее решать задачи навигации:

$$N_S^R = \frac{N^R}{S^R},$$

$$N_S^R \geq K_S^R,$$

где N_S^R – число моделей реперных объектов сцены визуализации имитатора радиолокатора на единицу площади; N^R – число моделей реперных объектов в сцене визуализации имитатора радиолокатора; K_S^R – минимальное число моделей реперных объектов на единицу площади сцены имитатора радиолокатора, позволяющее решать задачи навигации.

Как было показано раньше, имитатор визуальной обстановки дает летчику при обучении на авиационном тренажере максимальную информацию: кроме определения места нахождения модели реперного объекта в модели пространства и решения навигационных задач, этот имитатор позволяет тренировать глазомер. Поэтому при разработке сцен визуализаций для имитатора тепловизора и для имитатора радиолокатора за основу берут сцену визуализации для имитатора визуальной обстановки, или

$$N^V \supset N^Q,$$

$$N^V \supset N^R.$$

Заключение

1. Возможности оптико-программно-технических систем современных имитаторов синтеза для человека моделей внешней среды позволяют решить задачу синтеза во время полета на авиационном тренажере узнаваемого участка земной поверхности размером до 1500×1500 км с числом моделей реперных объектов, позволяющих решать задачи навигации и визуально определять расстояние до выбранных моделей реперных объектов.

2. Для модернизации пилотажных и комплексных авиационных тренажеров за счет добавления учебных ситуаций, связанных с решением навигационных задач, необходимо разработать сцены визуализаций для имитаторов визуальной обстановки, имитатора тепловизора и имитатора радиолокатора. При этом все модели реперных объектов в сцене визуализации для имитатора тепловизора

являются подмножеством моделей реперных объектов сцены визуализации для тепловизора имитатора визуальной обстановки.

Библиографический список

1. Main provisions for formation of cognitive model of visually observable environment synthesized for aircraft simulator / V. Roganov, M. Miheev, E. Roganova, B. I. Nurgozhin, V. Fillipenko // *Advances in Engineering Research : Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017)*. – Atlantis Press, 2017. – Vol. 133. – P. 671–676.
2. Проектирование оптических систем / под ред. Р. Шеннона. – Москва : Мир, 1983. – 430 с.
3. Modernisation of Endoscopic Equipment Using 3D Indicator / V. Roganov, M. Miheev, E. Roganova, O. Grintsova, J. Lavendels // *Applied Computer Systems*. – 2018. – Vol. 23, № 1. – P. 75–80. – DOI 10.2478/acss-2018-0010 <https://www.degruyter.com/view/j/acss>
4. Тренажерные системы / под ред. В. Е. Шукшунова. – Москва : Машиностроение, 1981. – 256 с.
5. Годунов, А. И. Концептуальная модель формирования летных навыков в процессе тренажерной подготовки / А. И. Годунов, Б. Ж. Куатов, Н. К. Юрков // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2014. – № 3 (19). – С. 15–24.
6. Роганов, В. Р. Имитаторы визуальной обстановки для тренажеров подготовки водителей транспортных средств / В. Р. Роганов, М. Ю. Михеев, Е. А. Асмолова, Т. В. Жашкова // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2016. – Т. 2. – С. 326–328.
7. Моделирование в профессиональной подготовке летного состава гражданской авиации // *Итоги науки и техн. Сер.: Воздушный транспорт*. – 1992. – № 25. – 136 с.
8. Юрков, Н. К. К проблеме структурного синтеза моделирующей среды авиационного тренажера / Н. К. Юрков, Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2015. – Т. 1. – С. 103–106.
9. Юрков, Н. К. Формирование моделирующей среды авиационного тренажера / Н. К. Юрков, Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2015. – № 1 (9). – С. 9–16.

References

1. Roganov V., Miheev M., Roganova E., Nurgozhin B. I., Fillipenko V. *Advances in Engineering Research: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017)*. Atlantis Press, 2017, vol. 133, pp. 671–676.
2. *Proektirovanie opticheskikh sistem* [Design of optical systems]. Ed. by R. Shennon. Moscow: Mir, 1983, 430 p. [In Russian]
3. Roganov V., Miheev M., Roganova E., Grintsova O., Lavendels J. *Applied Computer Systems*. 2018, vol. 23, no. 1, pp. 75–80. DOI 10.2478/acss-2018-0010 <https://www.degruyter.com/view/j/acss>
4. *Trenazhernye sistemy* [Training system]. Ed. by V. E. Shukshunov. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 256 p. [In Russian]
5. Godunov A. I., Kuvatov B. Zh., Yurkov N. K. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Aerospace University]. 2014, no. 3 (19), pp. 15–24. [In Russian]
6. Roganov V. R., Mikheev M. Yu., Asmolova E. A., Zhashkova T. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 326–328. [In Russian]
7. *Itogi nauki i tekhn. Ser.: Vozdushnyy transport* [Results of science and technology: Air transport]. 1992, no. 25, 136 p. [In Russian]
8. Yurkov N. K., Kemalov B. K., Kuvatov B. Zh. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, vol. 1, pp. 103–106. [In Russian]
9. Yurkov N. K., Kemalov B. K., Kuvatov B. Zh. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 1 (9), pp. 9–16. [In Russian]

Роганов Владимир Робертович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: Vladimir_roganov@mail.ru

Roganov Vladimir Robertovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of information
technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Кувшинова Ольга Александровна

старший преподаватель,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: oly791702@rambler.ru

Есимова Нурзипа Сапаровна

начальник научного отдела,
Гуманитарно-технический институт «Акмешит»
(Казахстан, г. Кызылорда);
аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: nurzipa.esimova@mail.ru

Асмолова Екатерина Александровна

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11);
менеджер Фестиваля НАУКА 0+,
АНО «Центр по развитию технологий будущего»
E-mail: logani@mail.ru

Тюрина Лилия Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Kuvshinova Olga Alexandrovna

senior lecturer,
Penza State University of Architecture
and Construction
(28 German Titov street, Penza, Russia)

Yesimova Nurzipa Saparovna

head of scientific department,
Humanitarian and Technical Institute "Akmeshit"
(Kyzylorda, Kazakhstan);
postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Asmolova Ekaterina Aleksandrovna

postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia);
manager of Festivals NAUKA 0 +,
ANO Center for the Development
of Future Technologies

Tyurina Lilia Alexandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technosphere security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Совершенствование эргатических программно-технических комплексов «Авиационный тренажер» за счет добавления учебных ситуаций, связанных с решением задач самолетовождения / В. Р. Роганов, О. А. Кувшинова, Н. С. Есимова, Е. А. Асмолова, Л. А. Тюрина // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 96–105. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-10.

Р. О. Мишанов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

R. O. Mishanov

THE APPLICATION OF SINGLE-LAYER PERCEPTRON FOR SOLVING PATTERN CLASSIFICATION TASK OF ELECTRONIC COMPONENTS IN ORDER TO IMPROVE THE QUALITY AND RELIABILITY OF ONBOARD EQUIPMENT

Аннотация. Рассматривается возможность применения однослойных перцептронов с различным количеством скрытых нейронов для классификации электрорадиоизделий на классы годных и потенциально дефектных изделий. В качестве исходных данных используются прогнозируемый (выходной) и информативные (входные) параметры микросхем. Обучение сетей проводилось с использованием программы «Deductor Academic», которая позволила определить основные параметры сети: значения синаптических весов и порогов для каждого нейрона. После обучения каждой сети были определены отклики на каждый пример обучающей выборки и сравнены с эталонными значениями. Оценка эффективности сетей проводилась по точности моделирования и классификации.

Ключевые слова: однослойный перцептрон, индивидуальное прогнозирование, классификация, электрорадиоизделие, линейно-разделимые классы, образ, скрытый нейрон, нейронная сеть, обучение нейросети.

Abstract. The article is devoted to the possibility of single-layer perceptron application with a different number of hidden neurons for classifying electronic components into classes of acceptable and potentially defective instances. The forecasted (output) and informative (input) parameters of the integrated chips are used as the initial data. Network training was carried out using the software «Deductor Academic», which allowed determining the main network parameters: the values of synaptic weights and thresholds for each neuron. After training each network, the responses to each example of training sample were determined and compared with reference values. Evaluation of the network efficiency was carried out according to the accuracy of modeling and classification.

Keywords: single-layer perceptron, individual forecasting, classification, electronic component, linearly separable classes, pattern, hidden neuron, neuron network, neuron network training.

Введение

Прогнозирование состояния электрорадиоизделий (ЭРИ) на определенный срок службы радиоэлектронных средств, устанавливаемых на борт космических аппаратов, – один из способов повышения качества и надежности сложной аппаратуры. Наиболее успешно данную задачу можно решить с помощью индивидуального прогнозирования (ИП) состояния ЭРИ, которое позволяет по характеристикам конкретного экземпляра провести прогноз состояния этого экземпляра с использованием математической модели с заранее выбранным упреждением [1]. Но не всегда модели, показавшие свою эффективность для конкретного типа ЭРИ, могут давать такой же эффект для другого типа ЭРИ. Более того, эффективность таких моделей может различаться для ЭРИ из разных партий и при разных условиях изготовления. Таким образом, поиск новых способов ИП, основанных на различных математических методах и моделях, способов отбраковки, основанных на применении диагностического неразрушающего контроля (ДНК), не теряет свою актуальность и в настоящее время.

При использовании ИП состояния изделий необходимо наличие исчерпывающей информации, включающей в себя сведения:

- о физико-химических процессах, происходящих в материалах изделия и влияющих на электрические параметры;
- влиянии условий окружающей среды на скорость протекания физико-химических процессов в структуре изделий;
- динамике изменений электрических характеристик изделий, что невозможно узнать без статистических данных об испытаниях этих изделий.

При использовании ИП целесообразно воспользоваться положениями теории распознавания образов, согласно которой каждый рассматриваемый экземпляр выборки представляет собой образ (точку, объект) в n -мерном пространстве признаков [2]. Таким образом, основной задачей классификации является разбиение совокупности таких образов в соответствии с некоторым критерием оптимальности. Задачи классификации решаемы с помощью большого количества методов и подходов, но особый интерес представляет применение искусственных нейронных сетей вследствие их нелинейности, способности адаптации при изменении параметров объектов, а также организации под решение конкретных задач [3, 4].

Одной из простейших форм искусственных нейронных сетей, успешно решающей задачу классификации линейно-разделимых множеств, является однослойный персептрон, который состоит из слоя входных данных (Input), одного скрытого слоя (Hide) и слоя выходных данных (Output). Было доказано, что если образы обучающего множества выбраны из двух линейно-разделимых классов, то алгоритм персептрона является сходящимся и образует поверхность решений в виде разделяющей гиперплоскости в гиперпространстве признаков [3].

Однослойный персептрон с одним скрытым нейроном ограничен решением задачи разделения на два класса линейно-разделимых образов. При увеличении количества скрытых нейронов возрастает количество классов, на которые можно разделить совокупность [3, 5]. Данное правило справедливо для линейно-разделимых множеств, т.е. когда классы явно выделяются и, как следствие, когда образы разных классов имеют максимальные различия признаков.

Задача классификации

В статье поставлена задача классификации выборки интегральных микросхем 765 серии с помощью трех конфигураций однослойного персептрона (рис. 1). Характеристики выборки микросхем представлены в работе [6]. Точность классификации оценивалась по вероятностным характеристикам, а также по величине ошибки отклонения от эталонных значений.

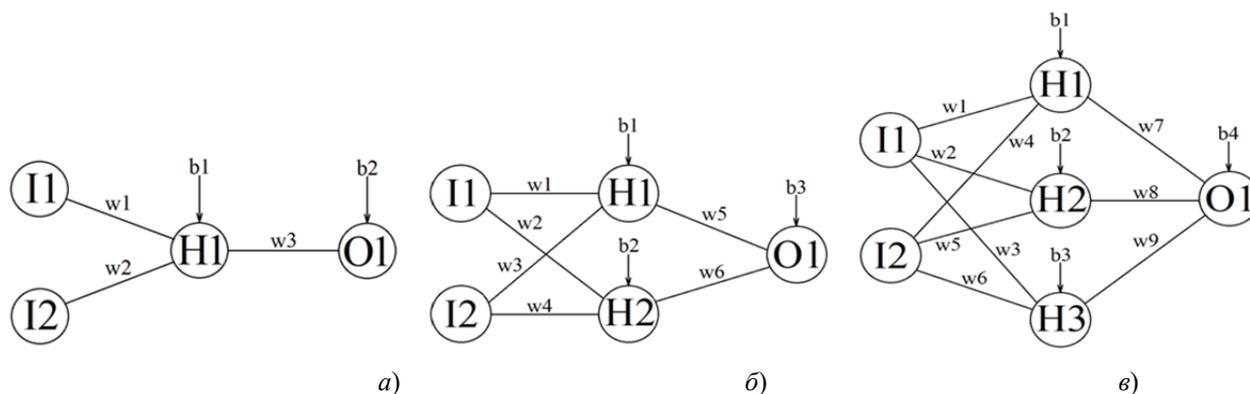


Рис. 1. Структуры однослойного персептрона:

a – с одним скрытым нейроном; *б* – с двумя скрытыми нейронами; *в* – с тремя скрытыми нейронами

В работе использовалось программное средство Deductor Academic [7]. Для обучения сети в качестве входных данных были выбраны информативные параметры X_1 и X_2 , в качестве выходных – $Y(1000)$. Обучающее множество состояло из 46 наблюдений, тестовое – из 4 наблюдений.

В качестве алгоритма обучения сети был выбран метод эластичного распространения (Resilient Propagation – Rprop) [5] с параметрами обучения, указанными на рис. 2.

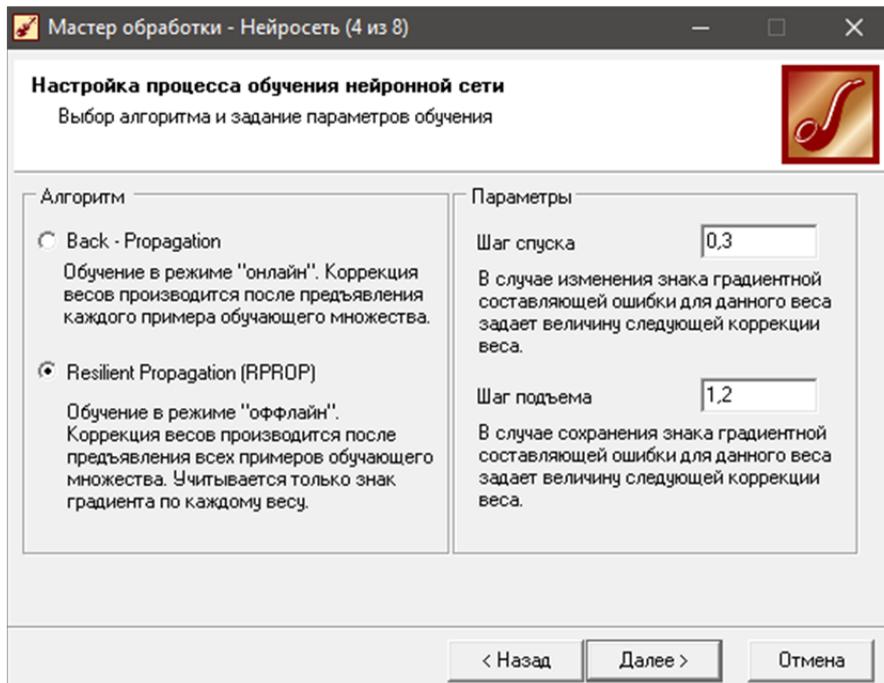


Рис. 2. Параметры обучения сети

Величина ошибки распознавания была выбрана равной 0,05. Таким образом, если отклик на выходе сети имеет различие менее 5 % с эталонным значением, то пример считается распознанным. Критерием корректного обучения сети был выбран случай, при котором все примеры обучающего и тестового множества были распознаны, а средняя ошибка принимала минимальное значение. Количество эпох обучения найдено экспериментальным путем. Для первой сети стабилизация ошибок наблюдалась на 9600 эпохе, для второй сети – на 7000 эпохе, для третьей сети – на 5500 эпохе. На рис. 3–5 показаны результаты обучения каждой из сетей.

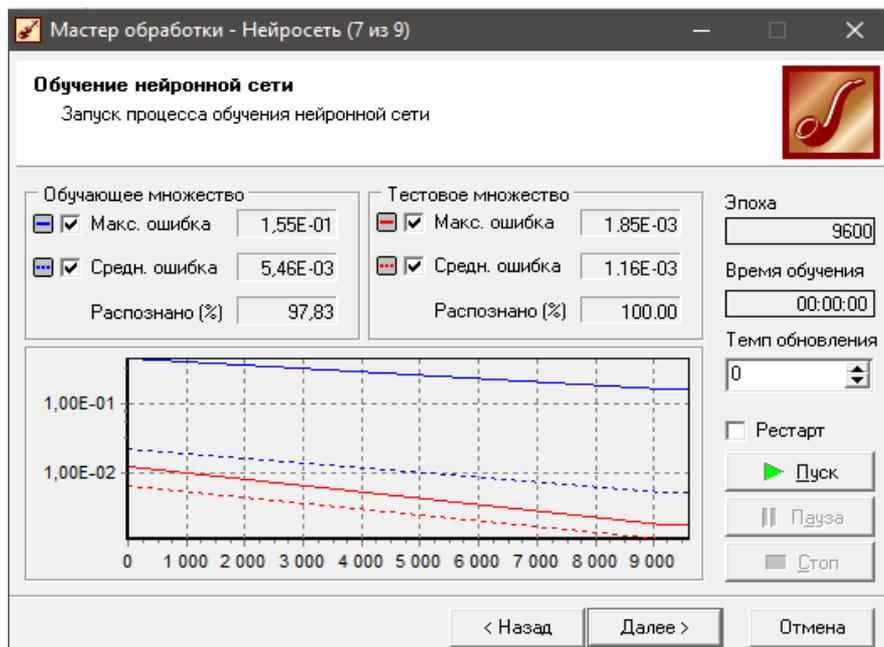


Рис. 3. Результаты обучения сети с одним скрытым нейроном

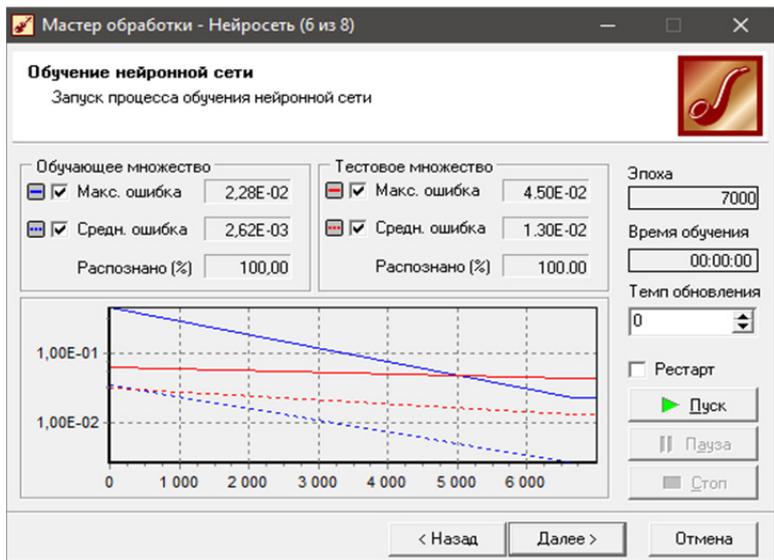


Рис. 4. Результаты обучения сети с двумя скрытыми нейронами

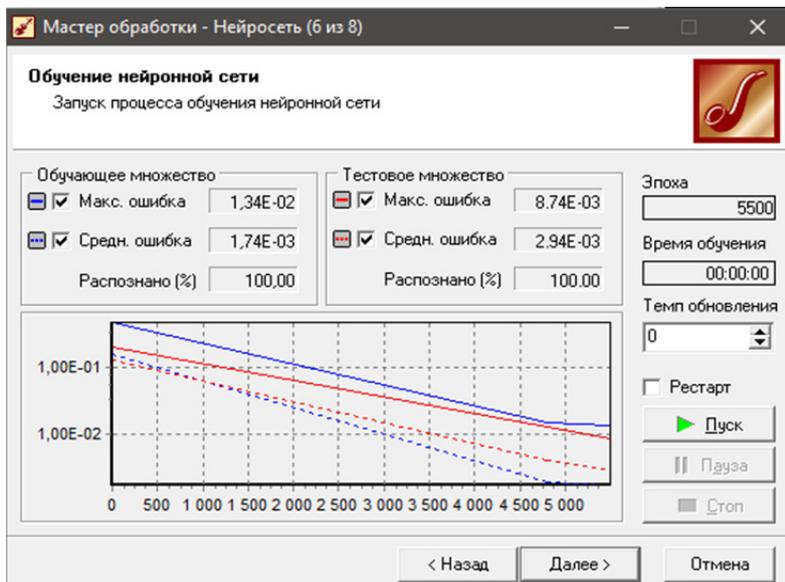


Рис. 5. Результаты обучения сети с тремя скрытыми нейронами

Результатом настройки персептрона является определение синаптических весов w и порогов b . В табл. 1 представлены результаты настройки. Результаты распознавания и классификации представлены в табл. 2. Для удобства восприятия результатов удобно пользоваться диаграммами рассеяния выходных данных, показанными на рис. 6–8.

Таблица 1

Результаты настройки параметров персептрона

Персептрон с одним скрытым нейроном				Персептрон с двумя скрытыми нейронами				Персептрон с тремя скрытыми нейронами			
w_1	-0,96	b_1	-1,683	w_1	2,207	b_1	-0,062	w_1	-17,692	b_1	5,339
w_2	0,142	b_2	4,025	w_2	7,856	b_2	-25,444	w_2	-13,439	b_2	-1,914
w_3	-24,47			w_3	-0,939	b_3	-3,795	w_3	-5,11	b_3	-1,491
				w_4	-73,143			w_4	31,879	b_4	0,087
				w_5	10,825			w_6	-0,451		
				w_6	-1,754			w_7	5,991		
								w_8	-5,759		
								w_9	-2,962		

Таблица 2

Результаты распознавания и классификации

Номер экз.	Y	K _{факт}	Сеть с 1 скр. нейроном			Сеть с 2 скр. нейронами			Сеть с 3 скр. нейронами		
			Y _{расп}	Y _{расп.ош}	K _{расп}	Y _{расп}	Y _{расп.ош}	K _{расп}	Y _{расп}	Y _{расп.ош}	K _{расп}
1	20	1	25,0777	0,001007	1	20,7943	0,000025	1	12,4156	0,002247	1
2	38	1	47,3104	0,003386	2	42,4073	0,000759	2	50,6552	0,006256	2
3	12	1	18,7031	0,001755	1	17,7296	0,001282	1	12,1728	0,000001	1
4	47	2	47,2401	0,000002	2	66,7239	0,015197	2	47,3185	0,000004	2
5	31	1	32,1992	0,000056	1	28,7806	0,000192	1	34,9675	0,000615	1
6	26	1	26,6837	0,000018	1	19,5037	0,001649	1	21,8373	0,000677	1
7	116	2	53,0848	0,154622	2	84,1787	0,039554	2	103,3356	0,006265	2
8	35	1	45,1181	0,003999	2	37,5548	0,000255	1	53,4961	0,013364	2
9	36	1	43,4806	0,002186	2	51,0094	0,0088	2	39,0726	0,000369	1
10	18	1	21,9595	0,000612	1	18,7747	0,000023	1	12,1495	0,001337	1
11	21	1	26,2044	0,001058	1	20,7099	0,000003	1	12,3031	0,002955	1
12	21	1	24,4435	0,000463	1	19,6317	0,000073	1	12,2256	0,003007	1
13	23	1	26,4425	0,000463	1	20,0722	0,000335	1	12,9042	0,003981	1
14	45	2	39,1435	0,001340	1	27,7649	0,011604	1	39,0515	0,001382	1
15	84	2	87,6945	0,000533	2	95,1455	0,004852	2	89,3558	0,00112	2
16	39	1	39,5847	0,000013	1	41,521	0,000248	2	38,3236	0,000018	1
17	37	1	45,167	0,002605	2	42,6361	0,001241	2	46,5455	0,003559	2
18	30	1	30,7557	0,000022	1	40,8925	0,004635	2	32,8148	0,00031	1
19	17	1	21,7836	0,000894	1	19,2876	0,000204	1	12,2997	0,000863	1
20	16	1	21,1191	0,001024	1	18,8366	0,000314	1	12,2251	0,000557	1
21	22	1	25,9694	0,000615	1	21,4093	0,000014	1	12,5635	0,003478	1
22	53	2	49,4902	0,000481	2	52,5162	0,000009	2	47,0936	0,001363	2
23	28	1	30,8908	0,000326	1	21,7923	0,001505	1	18,0845	0,003841	1
24	27	1	30,5982	0,000506	1	22,5854	0,000761	1	12,7505	0,007932	1
25	172	2	155,5933	0,010515	2	170,3053	0,000112	2	171,6006	0,000006	2
26	33	1	21,8392	0,004866	1	24,3342	0,002933	1	27,6497	0,001118	1
27	24	1	23,3895	0,000015	1	24,1131	0,000001	1	25,9931	0,000155	1
28	25	1	23,6477	0,000071	1	37,2858	0,005896	1	25,8218	0,000026	1
29	12	1	18,1061	0,001456	1	17,7795	0,001305	1	12,3127	0,000004	1
30	19	1	22,7211	0,000541	1	17,7797	0,000058	1	20,8732	0,000137	1
31	27	1	28,6862	0,000111	1	20,5557	0,001622	1	20,0203	0,001903	1
32	61	2	54,1228	0,001848	2	51,9014	0,003234	2	55,4601	0,001199	2
33	24	1	24,7478	0,000022	1	18,4659	0,001196	1	24,8057	0,000025	1
34	68	2	60,2658	0,002337	2	59,8528	0,002593	2	61,294	0,001757	2
35	83	2	80,4321	0,000258	2	80,6251	0,00022	2	82,9708	0,000001	2
36	29	1	26,9281	0,000168	1	22,4433	0,001679	1	28,5006	0,00001	1
37	16	1	20,8077	0,000903	1	17,5831	0,000098	1	12,3146	0,000531	1
38	34	1	39,2037	0,001058	1	43,3342	0,003403	2	36,7702	0,0003	1
39	41	2	33,6783	0,002094	1	37,5056	0,000477	1	32,8762	0,002578	1
40	44	2	43,3924	0,000014	2	40,7639	0,000409	2	45,0193	0,000041	2
41	36	1	61,7691	0,025939	2	53,4541	0,0119	2	41,7474	0,00129	2
42	27	1	28,798	0,000126	1	27,9883	0,000038	1	30,4365	0,000461	1
43	55	2	49,0704	0,001373	2	44,0402	0,004692	2	52,4507	0,000254	2
44	74	2	66,0753	0,002453	2	66,7068	0,002078	2	67,5726	0,001614	2
45	33	1	26,4806	0,001660	1	33,2456	0,000002	1	27,6128	0,001134	1
46	46	2	46,7404	0,000021	2	43,9216	0,000169	2	48,2747	0,000202	2
47	92	2	113,9586	0,018835	2	127,238	0,048505	2	106,962	0,008745	2
48	15	1	18,7131	0,000539	1	16,1656	0,000053	1	20,5126	0,001187	1
49	18	1	20,9888	0,000349	1	16,8244	0,000054	1	24,6003	0,001702	1
50	30	1	28,4408	0,000095	1	43,1078	0,006711	2	28,0708	0,000145	1

Таким образом, зная фактическую принадлежность экземпляров к классам годных и потенциально дефектных, а также класс экземпляров по распознаванию, можно оценить точность классификации по вероятностным характеристикам [8]. Кроме того, в качестве критерия выбора структуры персептрона целесообразно рассматривать величину средней ошибки распознавания, а также процент распознанных образов. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Вероятностные характеристики разбиения выборки

Показатели		Однослойный персептрон с одним скрытым нейроном	Однослойный персептрон с двумя скрытыми нейронами	Однослойный персептрон с тремя скрытыми нейронами
Классификация				
Риск изготовителя $R_{изг}$		0,278	0,381	0,235
Риск потребителя $R_{потр}$		0,0625	0,069	0,061
Вероятность принятия ошибочного решения $P_{ош}$		0,14	0,2	0,12
Моделирование				
Обучающее множество	Распознано примеров, %	97,83	100	100
	Средняя ошибка распознавания	$5,46 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$
Тестовое множество	Распознано примеров, %	100	100	100
	Средняя ошибка распознавания	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^{-3}$

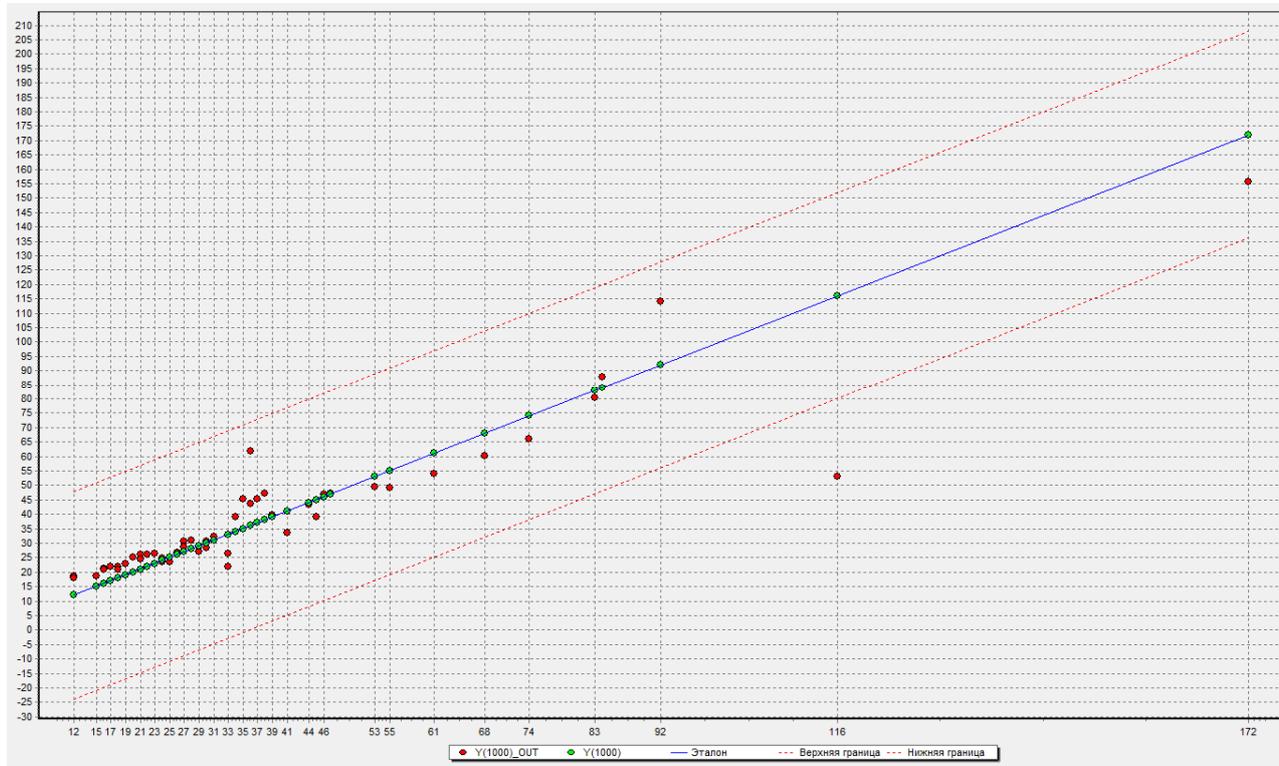


Рис. 6. Диаграмма рассеяния выходных данных по результатам обучения однослойного персептрона с одним скрытым нейроном

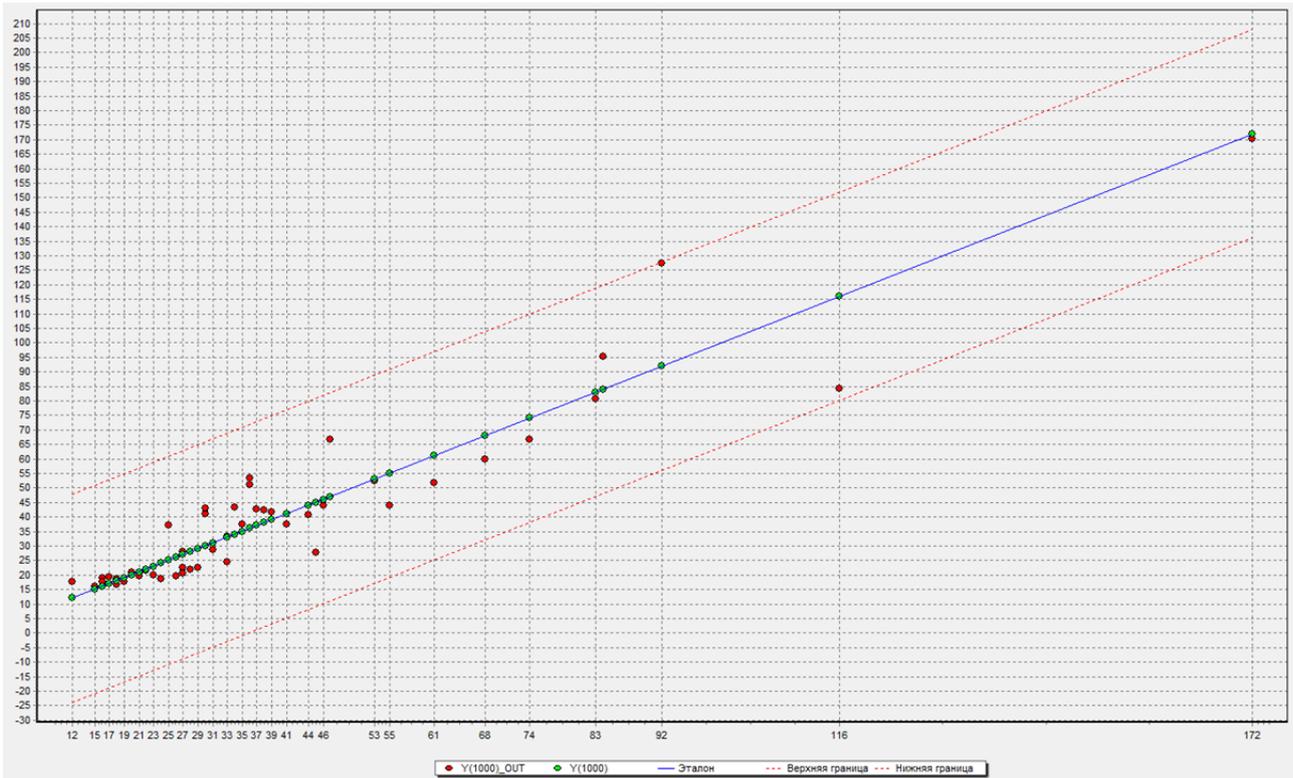


Рис. 7. Диаграмма рассеяния выходных данных по результатам обучения однослойного персептрона с двумя скрытыми нейронами

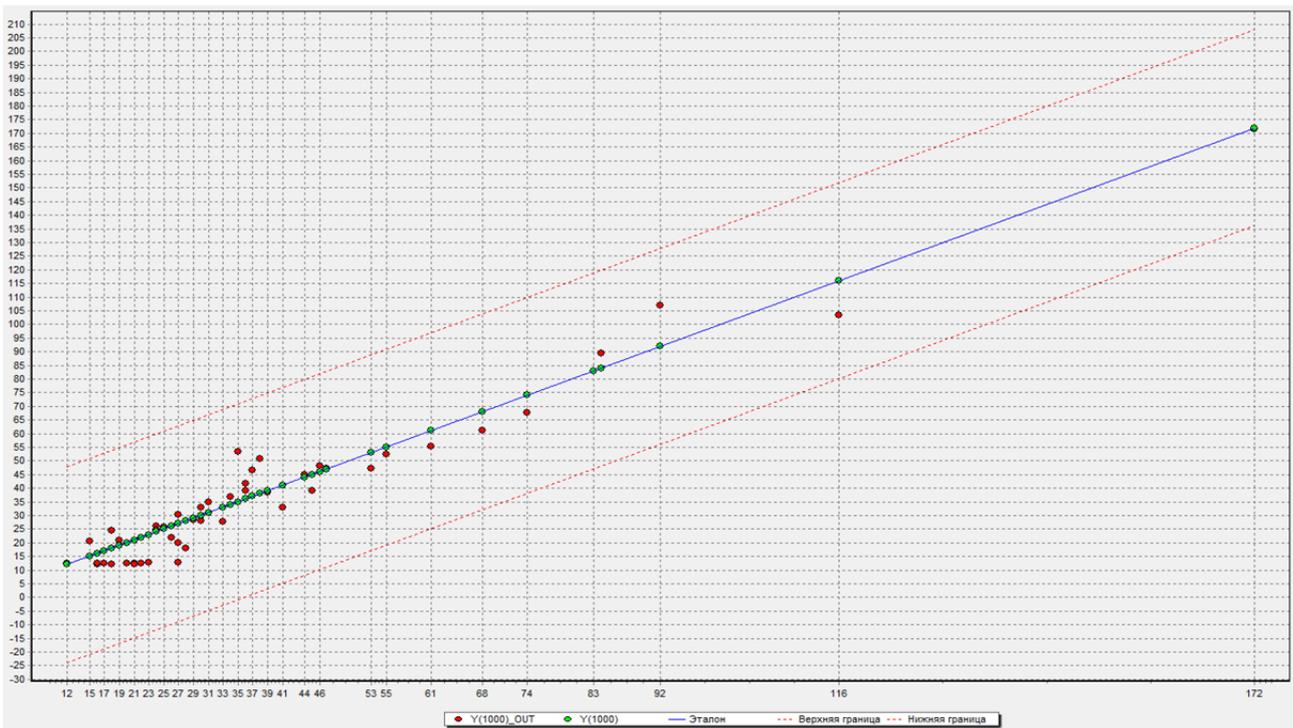


Рис. 8. Диаграмма рассеяния выходных данных по результатам обучения однослойного персептрона с тремя скрытыми нейронами

Заключение

По табл. 3 и при анализе диаграмм рассеяния, показанных на рис. 6–8, видно, что однослойный персептрон с одним скрытым нейроном не обеспечил высокую точность откликов, по сравне-

нию с эталонными значениями выходных данных. Кроме того, по диаграмме рассеяния видно, что одно наблюдение распознано с ошибкой более 5 %. По оценке средней ошибки распознавания обучающего множества можно сделать вывод, что однослойный персептрон с тремя скрытыми нейронами обеспечил более высокую точность разбиения по сравнению с однослойным персептроном с двумя скрытыми нейронами. При этом все примеры были распознаны с ошибкой менее 5 %. Кроме того, оценивая точность классификации, стоит отметить, что при использовании каждой структуры сети получены схожие значения риска потребителя. Однослойный персептрон с тремя скрытыми нейронами обеспечил сравнительно низкие значения риска изготовителя $P_{изг} = 0,235$ и риска принятия ошибочного решения $P_{ош} = 0,12$. Таким образом, для более качественной классификации интегральных микросхем, выбранных из партии, из которой произведена выборка, следует выбрать однослойный персептрон с тремя скрытыми нейронами.

Библиографический список

1. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок / М. Н. Пиганов. – Москва : Новые технологии, 2002. – 267 с.
2. Вапник, В. Н. Теория распознавания образов / В. Н. Вапник, А. Я. Червоненкис. – Москва : Наука, 1974. – 416 с.
3. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с.
4. Круг, П. Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры : учеб. пособие по курсу «Микропроцессоры» / П. Г. Круг. – Москва : Изд-во МЭИ, 2002. – 176 с.
5. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссермен ; пер. с англ. Ю. А. Зуева, В. А. Точенова ; под ред. А. И. Галушкина. – Москва : Мир, 1992. – 236 с.
6. Мишанов, Р. О. Методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности радиоэлектронных средств / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 1 (17). – С. 93–104.
7. Deductor. Руководство аналитика. Версия 5.3. – URL: https://basegroup.ru/system/files/documentation/guide_analyst_5.3.0.pdf.
8. Тюлевин, С. В. Индивидуальное прогнозирование электронных средств : учеб. пособие / С. В. Тюлевин. – Самара : Изд-во Самарского университета, 2016. – 65 с.

References

1. Piganov M. N. *Individual'noe prognozirovanie pokazateley kachestva elementov i komponentov mikrosborok* [Individual forecasting of quality indicators for elements and components of microassemblies]. Moscow: Novye tekhnologii, 2002, 267 p. [In Russian]
2. Vapnik V. N., Chervonenkis A. Ya. *Teoriya raspoznavaniya obrazov* [Pattern recognition theory]. Moscow: Nauka, 1974, 416 p. [In Russian]
3. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs* [Neural networks: full course]. Moscow: Vil'yams, 2006, 1104 p. [In Russian]
4. Krug P. G. *Neyronnye seti i neyrokomp'yutery: ucheb. posobie po kursu «Mikroprotsessory»* [Neural networks and Neurocomputers: tutorial on the course "Microprocessors"]. Moscow: Izd-vo MEI, 2002, 176 p. [In Russian]
5. Uossermen F. *Neyrokomp'yuternaya tekhnika: Teoriya i praktika* [Neurocomputer technology: Theory and practice]; transl. from Engl. Yu. A. Zuev, V. A. Tochenov. Moscow: Mir, 1992, 236 p. [In Russian]
6. Mishanov R. O., Piganov M. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 1 (17), pp. 93–104. [In Russian]
7. *Deductor. Rukovodstvo analitika. Versiya 5.3* [Deductor. Analyst's guide. Version 5.3]. Available at: https://basegroup.ru/system/files/documentation/guide_analyst_5.3.0.pdf. [In Russian]
8. Tyulevin S. V. *Individual'noe prognozirovanie elektronnykh sredstv: ucheb. posobie* [Individual forecasting of electronic means: tutorial]. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2016, 65 p. [In Russian]

Мишанов Роман Олегович

кандидат технических наук, ассистент,
кафедра конструирования и технологии
электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королёва
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Mishanov Roman Olegovich

candidate of technical sciences, assistant,
sub-department of design and technology
electronic systems and devices,
Samara University
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Мишанов, Р. О. Использование однослойного персептрона для решения задачи классификации электрорадиоизделий с целью повышения качества и надежности бортовой аппаратуры / Р. О. Мишанов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 106–114. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-11.

С. Ж. Куртаев, Б. Ж. Куатов

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР И ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ АВИАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ

S. Zh. Kurtayev, B. Zh. Kuvatov

METHOD OF INCREASING EFFICIENCY OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES AND PROCESSES OF SERVICE PRODUCTION OF AVIATION TECHNICAL CENTERS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для повышения эффективности эксплуатации авиационной техники за счет снижения расходов и повышения качества ее обслуживания в нынешних условиях возникает необходимость использования современных подходов к постановке и решению многокритериальной задачи оптимизации действующих организационных структур, в частности, авиационно-технических центров (АТЦ). *Материалы и методы.* Для реализации этой идеи проведен анализ теории и практики как функционирования действующих, так и вновь создаваемых организационных структур обслуживающих производств, который показал, что задача создания универсальной модели описательных языков организационных структур и производственных процессов сводится к разработке методов и средств распознавания функциональных состояний бортовых систем бортового комплекса оборудования ВС и их компонент. Поставлена и решена задача проектирования системы технического обслуживания ВС. Показано, что предлагаемая универсальная модель в рамках точного формализма позволяет представить действия и взаимодействия компонентов организационной структуры авиационно-технических центров. *Результаты и выводы.* Предложена методика, позволяющая оценить стоимость проекта модернизации обслуживающего производства авиакомпании из оценок отдельных элементов операционного комплекса.

Ключевые слова: авиационная техника, эксплуатация, оптимизация, описательный язык, образ.

Abstract. *Background.* To increase the efficiency of operation of aviation equipment by reducing costs and improving the quality of its service in the current conditions, there is a need to use modern approaches to the formulation and solution of the multi-criteria problem of optimizing existing organizational structures, in particular, aviation technical centers. *Materials and methods.* To implement this idea, an analysis of the theory and practice of both the functioning of existing and newly created organizational structures of service industries was carried out, which showed that the task of creating a universal model of descriptive languages of organizational structures and production processes is reduced to the development of methods and means of recognizing the functional states of onboard systems of the airborne complex aircraft equipment and their component. *Results.* The task of designing an aircraft maintenance system was posed and solved. It is shown that the proposed universal model within the framework of exact formalism allows us to represent the actions and interactions of the components of the organizational structure of aviation technical centers. *Results and conclusions.* A technique has been proposed that allows one to estimate the cost of a project to modernize an airline's serving production from estimates of individual elements of the operational complex.

Keywords: aviation equipment, operation, optimization, descriptive language, image.

Введение

Важным аспектом эффективной эксплуатации авиационной техники (АТ) является снижение расходов и повышение качества ее обслуживания, что требует развития обслуживающих ее производств на основе повышения эффективности его функционирования за счет оптимизации организационных структур и внедрения новых производственных процессов, создаваемых на основе системного подхода к достижениям в области искусственного интеллекта и их внедрения в организационные

структуры обслуживающего производства, в частности, авиационные технические центры (АТЦ), функционирующие, как правило, в изменяющихся внешних условиях, а, с другой стороны – новых методов синтеза и анализа образов, а именно математических моделей для описания как структурной, так и функциональной частей их организации с учетом требований к ним международных организаций ICAO, EASA и отечественных управляющих и надзирающих органов.

Адаптация действующих организационных структур к современным условиям составляет сущность модернизации как отдельных систем комплекса АТЦ, так и его в целом. Все это требует разработки новых научных методов исследования, направленных на достижения максимальной эффективности целевого функционирования обслуживающих производств.

Проблема разработки и внедрения методов и средств в практику поддержания летной годности ВС как решения задач распознавания состояния бортовых систем и их компонент в условиях всевозрастающих требований к качеству и эффективности обслуживающего производства приобретает особую актуальность.

Анализ требований и подходов к различным аспектам организации показывает, что они могут быть удовлетворены для сложных организационных структур, в которых обслуживающие производства играют решающую роль в обеспечении эффективности функционирования всей организации за счет постановки и решения многокритериальной задачи оптимизации. В этих условиях необходим аппарат решения таких задач, который позволил бы получать эффективные проектные решения, основанные на построении достаточно адекватных логико-математических моделей реальных объектов и процессов их функционирования и сравнения результатов исследования этих моделей.

Исходя из приведенной выше аргументации, разработка, исследование и внедрение новых принципов, подходов, методов и средств организации построения знаковых моделей объектов проектирования, обеспечивающих заданный набор требований, является актуальной проблемой достижения максимальной эффективности целевого функционирования модернизируемых или вновь создаваемых обслуживающих производств (ОП).

Универсальная модель описательных языков организационных структур и производственных процессов

Одной из центральных задач ОП авиакомпаний является задача распознавания функциональных состояний бортовых систем (БС) БКО ВС, с общих позиций, распознавание образов как множества состояний этих объектов, т.е. отнесения его на базе идентификации относительно заданного множества состояний к определенному классу соответствий.

Научная практика решения этой задачи для оценивания состояния БС связана с большим объемом информации, представленной на естественном и специальном языке, обработка которой потребовала разработки языковых проблем для поиска путей реализации целенаправленных процессов получения, передачи и обработки информации через непосредственное или опосредованное взаимодействие с объектами организованной среды (БКО) в системе «объект обслуживания (ОО) – подсистема оценивания (СО)», где СО способна обучаться распознавать функциональные состояния как образы самих состояний, специфически реагируя на результаты измерения физических характеристик ОО и их сравнения с эталоном распознаваемого объекта.

Как показал опыт решения задач распознавания образов ОО, ключевую роль играют идеи, связанные с описательными языками, что потребовало введения формальных определений таких понятий, как «описание», «описательный язык», «образ».

Используемый подход будем определять как теоретико-системный, базой для которого служат абстрактные теоретико-множественные понятия, лежащие в основе построения моделей задач. При этом прагматика и семантика задач представлена в формализованном виде на основе структурного описания образов.

В рамках данной работы ОО обозначаются заглавными буквами A, B, C и т.д., а его части или компоненты буквами латинского алфавита X, Y, U , вхождение которых в тот или иной ОО будет отображаться с помощью логического знака включения \subseteq , например, утверждение, что X включено в A , описывается выражением $X \subseteq A$, которое состоит из элементов или образующих x_1, x_2, \dots, x_n .

Так как в актах распознавания функциональных состояний для нас важны, прежде всего, не объекты и их части, а их свойства, то ОО рассматривается как совокупность свойств (признаки и связи).

Ключевым моментом в постановке задач распознавания состояний ОО является адекватное описание образов всех элементов задачи, в рамках точного формализма для создания универсальной модели описательных языков окружающей среды, ее частей и элементов функциональных состояний ОО.

Образ, с формальных позиций, – это математическая модель ОО, рассматриваемая как структурные части организации ОП, помещенные в среду авиакомпании, которая с общих позиций – это упорядоченная пара $\langle U, P \rangle$, где U – абстрактное множество БКО, а P – семейство нетривиальных разбиений на U , при этом P – конечное. Каждый элемент из P обладает свойством P , тогда каждый элемент $p \in P$ есть его значение. Нам всегда дано подсемейство P' из P , т.е. конкретный объект – это образ, который содержится в значении свойства этого объекта. Описание образа функционального состояния будет представлять булево выражение, содержащее заданные значения для «эталона» ОО или полученные в результате «измерений» для их «оригинала», включающих предикаты типа $P(u) = p$, где P – входное свойство, p – его значение.

Для конкретизации исследуемых объектов (БС) введено понятие подсемейства P' , заданное в P , которое в рамках теоретико-множественных представлений вводит реальный объект исследования, а среда БКО БС с этих позиций является реальной средой, т.е. она является тройкой $\langle U, P, P' \rangle$.

Определив класс всех функциональных состояний ОО k_p , состояние конкретной БС как подсемейства P' из P , будем определять семейством реальной структуры БС, если $k_{P'} = k_p$, а его конечная структура $P' = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ будет полной, если

$$P_{1,i1} \cap P_{3,i2} \cap \dots \cap P_{n,in} \neq \emptyset. \quad (1)$$

Для каждого $p_{r,ir} \in P$. Это семейство устанавливает границы различимости элементов области исследований.

При создании математических моделей этих элементов как образов в качестве исходных принципов использованы:

1. Объекты организации СО функциональных состояний, включающие ОО и ОП, строятся из образующих, представляющих неделимые или непроеизводные элементы в математической модели знаков [5]. Множество всех образующих для описания конкретных объектов организации выбирается на основе прагматики и семантики решаемой задачи и представляются в формализованном виде, математически могут быть записаны следующим образом:

$$X = \bigcup_{\alpha} X^{\alpha}, \quad (2)$$

где X^{α} – непересекающиеся классы, $X^{\alpha} \subset X$, при этом α – индекс класса образующих, каждая из которых обладает входным свойством, состоящим из элементов, обладающих различными типами признаков для каждого из них, в частности, в работе выделены в качестве первого типа их значения, как правило, это целые числа и в качестве второго – это связи, в которые может вступать образующая, которые выражаются составным числом, т.е. $p = p(x)$ и $p = p(x) - n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Число связей, образующих n , представляет $q(x) = q_{in}(x) + q_{out}(x)$, где in – число входов, образующих x , а out – число выходов y .

2. В рамках синтаксического подхода, принятого за основу моделирования компонентов ОО, считается, что образы строятся из соединенных по определенным правилам заданных образующих, из которых получают некоторые подобразы, с общих позиций; эти регулярные множества образуют класс языков, занимающий центральное место в описании подобразов (регулярные выражения или конфигурации). Набор образующих x_1, x_2, \dots, x_n и система правил их соединения Σ порождают множество регулярных конфигураций $\Phi(P)$, которые характеризуют отдельные стороны регулярности образов ОО и ОП. Формально конфигурация как подобраз представляется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \text{Состав: } c &= \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \\ \text{Структура: } (c) &= c \cup \sigma, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma \in \Sigma$ – тип соединения.

Для моделирования распознавания образов на основе сравнения оригинала с эталоном введено понятие множества преобразований подобия S – отображение s : структура $c_o \rightarrow$ структура c_e . Конфигурация образующих (непроизводных элементов, представляющих реальный ОО (оригинал)) сравнивается с конфигурацией эталона, построенного на основе предварительной обработки технической документации на ОО, т.е. структурного описания образа в рамках системы распознавания образов образующих и конфигураций. С формальных позиций любая конфигурация представляется множеством графов, элемент в котором в каждой из них является ориентированным линейным графом $G = \{A, \Sigma\}$, состоящим из множества образующих x_1, x_2, \dots, x_n вместе с множеством X упорядоченных по заданным правилам пар (x_i, x_j) элементов, взятых из X .

3. Изучение формальных аспектов задачи распознавания элементов образов и образов ОО и ОП в целом обнаружило необходимость создания универсальной модели описательного языка этих объектов, в которую укладывались бы языки описания ОО и ОП. Эти задачи сводятся к следующей постановке: «Дан класс образов. Создать описательный язык, допускающий компактные, удобные описания всех образов из этого класса». Для описания этого класса образов в работе предложена универсальная модель описательного языка $L(G)$, грамматикой которого является четверка

$$G = [V_N, V_T, P, S], \quad (4)$$

где V_N – конечное множество имен БС БКО, формирующих область рассуждений; V_T – конечное множество образующих, из которых строятся по определенным правилам регулярные конфигурации (цепочки, выражения), множество которых, в свою очередь, являясь абстрактными конструкциями, идентифицируются СО. Результаты наблюдения соответствуют некоторому множеству регулярных конфигураций и являются представлениями отдельных БС. Формализация этого обстоятельства посредством правила идентификации R позволяет построить эталон образа ОО или ОП из наперед заданного множества разбиений его на цепочки. Оригиналы ОО и ОП строятся на основе результатов, полученных с помощью реальной СО образующих этих объектов, представленных цепочками образующих оригинала.

Универсальный язык структурного описания этих образов позволяет поставить основную задачу оценивания путем введения структуры предикатов этого языка, каждый из них определяет результат теста, которому подвергается цепочка из описаний ОО, сконструированных для проверки наличия определенных подобразов, отвечающих заданным признакам. Метод выделения признаков связан с множеством преобразований сложных разделяющих функций от x и y

$$y_i = y_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad 1 \leq i \leq n, \quad (5)$$

которые приводят к простым функциям от y_i , что позволяет рассмотреть y_i как значимые признаки ОО и использовать их для последовательного обобщения в распознавании образов.

С помощью предложенного формализма грамматик, порождающих графы, решается задача предварительной обработки класса исходных объектов с целью эффективного описания для распознавания образов в системе «ОО – СО».

В рамках синтаксического подхода [4], центральная задача оценки и оценивания состояния ОО в организационной структуре АТЦ, реализующей форму распознавания «сравнение с эталоном», в которой используется отношение конгруэнтности для бесконечного языка. Две цепочки x и y конгруэнтны, если для двух цепочек u , описывающая «эталон» оценивания элемента ОО и v – «реальный» элемент ОО. uxv и uyv порождаются грамматикой конечноавтоматного типа, являющейся подмножеством бесконтекстной грамматики. В случае, если полученные описания u остаются сложными для применения, будут использованы свойства, отличные от входных. Для этого вводятся предикаты $u \in K$, где K – значение некоторого свойства, отличного от входного. При этом K рассматривается как подобраз [5].

Технология моделирования организационных структур и процессов обслуживающих производств

Разработанная модель функциональной части организации АТЦ, представляющая действия и взаимодействия компонентов его организационной структуры, обусловленных единством целей или выполняемых ими функций и реализующими определенные обстоятельства места и времени. Для решения этой задачи введено опорное пространство $X = R^3 \times R^1$, где R^1 – пространство времени,

а R^3 – пространство взаиморасположенных и взаимосвязанных компонент этой структуры как многомерного образа, описывающего их действия. Образующие, используемые при построении конфигурации действий, будут иметь следующие свойства: число входных и выходных связей ее многомерного конкретного аналога равны действительному числу в зависимости от решаемой ею задачи. В качестве общей образующей при решении задачи оценки параметров при ТО БС в работе использован оператор с v (переменными) входами x_1, x_2, \dots, x_v и μ (переменными) выходами y_1, y_2, \dots, y_μ . Для каждого x_i задана область значений пространства X_i , а область значений y_i – пространство Y_i . Для x_i существуют операторы назначения, представляющие значения соответствующего эталона, и операторы оценки, отражающие реальные состояния параметра ОО, а y_i есть значение в зависимости от типа обслуживания (преобразование) из области пространства Y_i . Типичность такой образующей позволит построить конфигурации для реализации разных типов действий, каждый из которых характеризуется своим индексом α , набор которых для X будет определять репертуар действий. Оценка состояния ОО построена из двух пространств одинаково за исключением того, что одно из них на базе множества образующих X , а другое – из X' , причем $X \subseteq X'$, где X' обладает большей значимостью и более сложной структурой для оценок параметров ОО.

Цепочка из образующих X' , представляющих реальный образ ОО, сравнивается с цепочками образующих из X эталонного образа на основе преобразования подобия, которые включают в себя сдвиги по времени $t \rightarrow t + h$. Воздействия на показатели связей образующих будут сводиться к тому, что они примут значения $t_{in} + h, t_{out} = h$, а также используются пространственные преобразования.

Для построения конфигураций действия по ТО БС, состоящих из комбинации элементарных действий, вводится тип соединения Σ – частичный порядок в множество этих действий, т.е. определяется совокупность действий по распознаванию состояния ОО (табл. 1), зависящих при оперативном ТО от характера методов и средств и от материалов, к которым эти средства применяются, чтобы получить требуемый результат.

Таблица 1

Символ	Название	Описание
○	Операции	поиска, нахождения, захвата, удержания, перемещения
□	Осмотр	исследование и испытание ОО
Ⓜ	Задержка	замена и диагностика отказавших компонентов ОО
⇔	Перемещение	сдача отказавших компонентов на главный склад
∇	Результат	оценка состояния ОО

Для задания основных действий специалиста по оперативному ТО БС было предложено использовать пять символов, определяющих классы образующих, которые обладают многочисленными признаками, идентификаторами, мерами и т.д.

В рамках принятого формализма диаграмме действий авиатехника при оперативном обслуживании соответствует особая образующая, для которой число входов и выходов равно 2, а значения ее признаков равны между собой. Ее роль состоит в синхронизации событий в определенные моменты времени. Эти образующие являются комбинациями основных действий, соединяемых вместе в установленном порядке с соответствующими временными ограничениями (рис. 1).

Рассмотрено семейство простых признаков a , каждый из которых – это функция, определенная на X и принимающая значения (результат сравнения) «норма» 1 или «ненорма» 0.

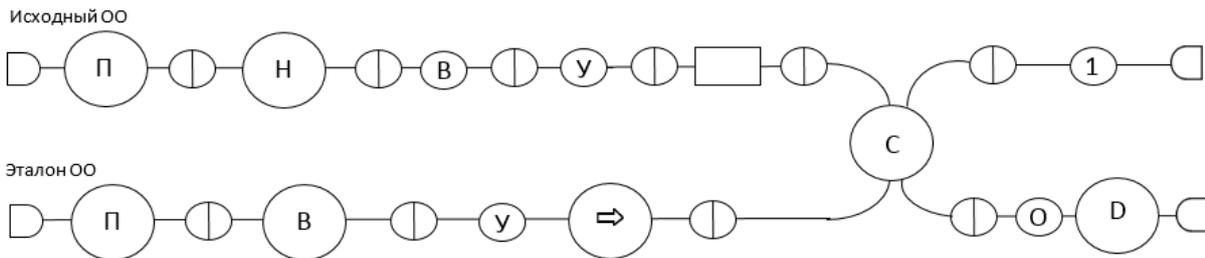


Рис. 1. Особая образующая действий авиатехника

Классы образующих элементарных действий A^{α} будут состоять из попарно сравниваемых признаков, принадлежащих эталону и исходному (реальному) ОО, т.е. если $a_3, a_0 \in A^{\alpha}$, то первый влечет второй, так что $a_3 \rightarrow a_0$ или $a_0 \rightarrow a_3$.

Сформулирован общий подход к оценке полученных при обслуживании результатов. Если для двух элементов x и y из X имеем $a(x) = a(y) \rightarrow a \in A$, то отсюда вытекает, что $x = y$ («норма») или иначе $x \neq y$ («ненорма»). Эти оценки являются образующими, характеризующими структуру оценивания состояния ВС инженером. Логика определена с помощью множества A , состоящего из признаков $a_1, a_2, \dots, a_{n-i+1}$, где $a_i(x)$ = норма, если $x \neq i, i + 1, i + 2, \dots, i + n - 1, 1$ – фиксированное натуральное число, не превосходящее n . A разделяет точки (параметры) опорного пространства, в котором определяется состояние ОО.

Для реализации этих действий поставлена и решена задача проектирования системы ТО ВС как сложного комплекса взаимодействующих компонент этой системы – ее функциональной части, обусловленной единством целей или выполняемых ими функций.

Сформулирован общий подход к концепции проектирования (синтеза) системы ТО ВС АТЦ, который базируется на разбиении общей задачи Z_0 поддержания летной годности ВС на подзадачи: оперативного ТО, включающего линейное ТО Z_1 , ТО на базе линейного ТО один раз в 48–60 календарных часов Z_2 , ТО один раз в 8 календарных дней Z_3 , ТО один раз через 750 часов полета, представленные деревом на рис. 2.

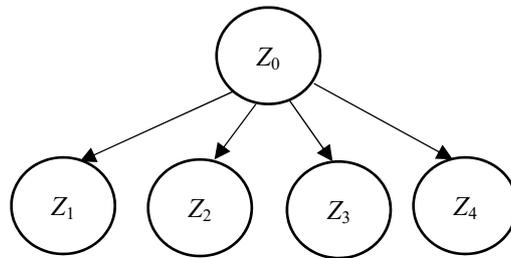


Рис. 2. Разбиение задачи на подзадачи

Каждая подзадача требует для своего разрешения, соответствующего определенным требованиям EASA, организационной структуры с соответствующим набором компонент и их взаимосвязью, реализация действий и взаимодействий в которой осуществляется на базе особых образующих действий исполнителей операций ТО (см. рис. 1). При возникновении отказов (не норма), например, при решении подзадачи P_i , она разбивается на новые подзадачи (рис. 3).

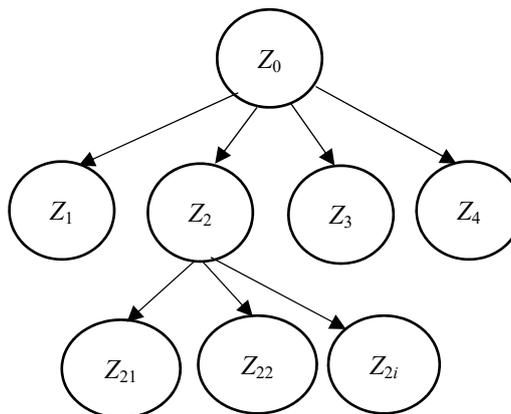


Рис. 3. Разбиение подзадачи Z_2

Если ТО завершено, то множество подзадач, на которое разбита задача, с общих позиций, будет представлено [6]

$$\{Z_{i1}\} \cup \{Z_{i2}\} \cup \dots \cup \{Z_{ik}\} = \{Z_k\},$$

где $\{Z\}$ обозначает множество всех допустимых решений, определяющих параметры состояния ОО. При этом состояние ОО определяется набором значений его признаков (параметров) в определенный момент времени t . В рамках синтаксического подхода, принятого в работе для распознавания состояния ОО – это образ f , описываемый цепочкой производных элементов (образующих), наблюдаемых параметров, представляющих ОО, который сравнивается для распознавания состояния этого объекта с цепочками производных элементов, представляющих каждый эталонный образ q . При этом определяется, насколько точно два объекта согласуются друг с другом. Подсчет взаимных корреляций между двумя функциями f и q служит одним из простых методов установления идентичности двух объектов (эталонного и ОО).

Задача оценивания состояния БКО в целом потребовала исследования организации и функционирования человеко-наполненных систем.

Теоретический подход к решению этой проблемы базируется на использовании той же концептуальной основы для синтеза образа, в которой учитывается сложный характер образующих, позволяющих описывать организацию ОП на основе измеренной информации – значений ее количества, для получения которой используется двузначное логическое исчисление высказываний и функций высказываний.

Для правильно построенных выражений в исчислении высказываний введена грамматика непосредственных составляющих, представленная в монографии Гизбурга [1], которая позволяет получить эти выражения, используя:

– терминальные элементы

$$V_T = \{x_1, x_2, \dots, x_n; \wedge, \vee, \sim, \cdot, \cdot\}, \tag{6}$$

– нетерминальный элемент, синтаксическую переменную σ и правила

$$R = \{\sigma \rightarrow x_i, \dots, \sigma \rightarrow x_n, \sigma \rightarrow (\sigma \wedge \sigma), \sigma \rightarrow (\sim \sigma)\}. \tag{7}$$

При этом все цепочки, порождаемые этой грамматикой, являются правильными выражениями в исчислении высказываний.

Используя этот язык и результаты Маккаллока и Питтса [1, 2] по модели абстрактного нейрона в работе для описания сложной деятельности специалистов по определению состояния агрегатов и БС, введены понятия абстрактного нейрона или модуля M (образующей) и модульной сети, построенной из конечного числа этих модулей, активность которых выражается с помощью формул двузначной логики высказываний и функций высказываний, описывающих функционирование сети (функциональная часть организации, оценки и оценивания состояния агрегатов и БС) формулой

$$P(t) = x_1(t-1) \wedge x_2(t-1) \dots x_k(t-1), \tag{8}$$

где $P(t)$ – состояние выходного модуля M в момент времени t , а $x_i(t-1)$ – состояние входных модулей m_i в момент $(t-1)$ выражает логически тот факт, что модуль возбужден в момент t в том и только в том случае, если модули m_1, m_2, \dots, m_k были возбуждены в момент $(t-1)$, а остальные модули m_{n-k} находились в состоянии покоя.

Эквивалентное представление функционирования организационной структуры ОП как модульной сети описывается следующим образом. Вход в модульную сеть (осуществляемый входными модулями – линейными специалистами организации ТО) все время их работы до момента t описывается табл. 1 (таблицей входа).

Таблица 1

Момент времени	m_1	m_2	m_3	...	m_{n-1}	1
$t-1$	1	1	0		1	0
$t-2$	1	1	1		0	0
$t-3$	0	1	1		0	1

Таблица входа отражает определенные события за фиксированный промежуток, т.е. оценивание состояния БС по результатам оценок, полученных инженером от авиатехников.

Таким образом, модульная сеть – организационная структура, реализующая в этой структуре функцию состояния для агрегатов и БС, представляющая функционирование структурной части ор-

ганизации ТО, т.е. каждой модульной ациклической сети, которая моделирует организационную структуру ТО, порождающую определенное событие (оценивание) действиями авиатехников (оценки, возбуждение внутреннего модуля) в момент, $\tau \geq 1$.

Для определения соответствия между состояниями «оригинала» и «эталона» вводится понятие регулярности события. Каждому регулярно событию соответствует равенство, с одной стороны, между множеством таблиц, описывающих оригинал и эталоны, представляющие их функции f_0 и f_3 , т.е. $f_0 = f_3$, с другой – модульные сети, представляющие эти функции при возбуждении одинаковых внутренних модулей в момент $t + \tau$ при условии, что все внутренние модули в начальный момент находятся в соответствующих состояниях. Лицо, принимающее решения, т.е. осуществляющее оценивание, модулируется модулем с более общими свойствами, в которых число состояний активности больше двух.

Модульные сети, включающие входные модули с двумя состояниями, а внутренние имеют разное число состояний, следуя Клини, будем называть конечным автоматом, который в рамках решения задачи определения состояния объекта ТО, реализующим форму распознавания сравнение с эталоном с помощью просмотра их таблиц входов и выходов. При этом оценивание есть функция f , определенная на множестве оценок «оригинала» X со значениями в множестве «эталона» Y или в теоретико-множественные символики

$$f: X \rightarrow Y. \tag{9}$$

Полное соответствие «оригинала» с функцией f выражается равенством функции q «эталона», т.е. $f = q$. Это и другие события реализуются в ациклической модульной сети (конечным автоматом). В случае отсутствия равенства $f \neq q$ события реализуются модульной сетью с временем задержки.

Методика оценивания стоимости проекта модернизации обслуживающего производства авиакомпания из оценок отдельных элементов операционного комплекса

Оценивание стоимости проекта модернизации ОП, состоящей из многих отдельных частично упорядоченных работ, в рамках синтеза образа оценок с помощью конфигурации, образующие которой являются операторы с тремя входами $a(x, y)$, $b(x, y)$ и $c(x, y)$, причем $a(x, y) \leq b(x, y)$. Эти значения интерпретируются следующим образом: $a(x, y)$ – аварийное время выполнения работ по модернизации (x, y) , $b(x, y)$ – нормальное время ее выполнения и $c(x, y)$ – убывание стоимости выполнения этой работы на единицу возрастания времени от $a(x, y)$ до $b(x, y)$ или стоимость выполнения работы (x, y) за $\tau(x, y)$ единиц времени, определяемой по известной формуле

$$k(x, y) - c(x, y) \cdot \tau(x, y) \tag{10}$$

на промежутке

$$a(x, y) \leq \tau(x, y) \leq b(x, y). \tag{11}$$

В случае множества работ стоимость проекта по модернизации будет определяться выражением

$$\sum_{x,y} [k(x, y) - c(x, y) \tau(x, y)], \tag{12}$$

которая была бы минимальной, если функция

$$\sum_{x,y} c(x, y) \tau(x, y)$$

принимала бы максимальное значение. Тогда минимальная стоимость проекта для заданного λ единиц времени будет определяться формулой

$$C(\lambda) = \sum k(x, y) - \max \sum c(x, y) \cdot \tau(x, y), \tag{13}$$

где максимум берется по всем $\tau(x, y)$ при заданных ограничениях на модернизацию организационной структуры ОП.

Заключение

Поставлена и решена задача проектирования системы ТО ВС как сложного комплекса взаимодействующих компонент этой системы – ее функциональной части, обусловленной единством целей

или выполняемых ими функций. Сформулирован общий подход к концепции проектирования (синтеза) системы ТО ВС АТЦ. Рассмотренный метод позволяет обоснованно подходить к выбору мест подразделений СТО, имеет простую программную реализацию и обеспечивает выбор варианта по критерию минимизации затрат при условии возможности оценки работоспособности всех воздушных судов авиакомпании.

Библиографический список

1. Гренандер, У. Лекции по теории образов. Синтез образов / У. Гренандер. – Москва : Мир, 1979. – Т. 1. – 384 с.
2. Гренандер, У. Лекции по теории образов. Анализ образов / У. Гренандер. – Москва : Мир, 1981. – Т. 2. – 447 с.
3. Гренандер, У. Лекции по теории образов. Регулярные структуры / У. Гренандер. – Москва : Мир, 1983. – Т. 3. – 432 с.
4. Фу, К. Структурный метод в распознавании образов / К. Фу. – Москва : Мир, 1977. – 320 с.
5. Коптев, А. Н. Разработка методики оценки технического состояния объектов обслуживания перспективных авиационных комплексов на основе формализованных знаний / А. Н. Коптев, Б. Ж. Куатов, С. Ж. Куртаев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 242–244.
6. Юрков, Н. К. Модели и алгоритмы управления интегрированными производственными комплексами : монография / Н. К. Юрков. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2003. – 198 с.

References

1. Grenander U. *Lektsii po teorii obrazov. Sintez obrazov* [Lectures on the theory of images. The synthesis of images]. Moscow: Mir, 1979, vol. 1, 384 p. [In Russian]
2. Grenander U. *Lektsii po teorii obrazov. Analiz obrazov* [Lectures on the theory of images. Image analysis]. Moscow: Mir, 1981, vol. 2, 447 p. [In Russian]
3. Grenander U. *Lektsii po teorii obrazov. Regulyarnye struktury* [Lectures on the theory of images. Regular structure]. Moscow: Mir, 1983, vol. 3, 432 p. [In Russian]
4. Fu K. *Strukturnyy metod v raspoznavanii obrazov* [Structural method in pattern recognition]. Moscow: Mir, 1977, 320 p. [In Russian]
5. Koptev A. N., Kuvatov B. Zh., Kurtaev S. Zh. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 242–244. [In Russian]
6. Yurkov N. K. *Modeli i algoritmy upravleniya integrirovannymi proizvodstvennymi kompleksami: monografiya* [Models and algorithms for the management of integrated industrial complexes : monograph]. Penza: IITs PGU, 2003, 198 p. [In Russian]

Куртаев Сабит Жанболатович

начальник кафедры конструкции и эксплуатации авиационного оборудования, Военный институт Сил воздушной обороны Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова (Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: sabit5@mail.ru.

Куатов Бауржан Жолдыбаевич

PhD, доцент, заместитель начальника по учебной и научной работе, Военный институт Сил воздушной обороны Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова (Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru.

Kurtayev Sabit Zhanbolatovich

head of the department of design and operation of aviation equipment, Air Defense Forces of the Military Institute of the Republic of Kazakhstan named after T. Y. Begeldinov (16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

Kuatov Baurzhan Zholdybaevich

PhD, associate professor, deputy chief for academic and scientific works, Air Defense Forces of the Military Institute of the Republic of Kazakhstan named after T. Y. Begeldinov (16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Куртаев, С. Ж. Метод повышения эффективности организационных структур и процессов обслуживающих производств авиационных технических центров / С. Ж. Куртаев, Б. Ж. Куатов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 115–123. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-12.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 681.2.084-192

DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-13

Е. А. Воронин

ОЦЕНКА И ВЫБОР СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВИЕМ

Е. А. Voronin

EVALUATION AND SELECTION OF FOOD SECURITY SYSTEMS

Аннотация. Продовольственная безопасность является ключевой проблемой государственной безопасности. Она реализуется системами государственного и частного продовольственного обеспечения. Выбор оптимального варианта этой системы есть важная технико-экономическая задача. Ее решение невозможно без теоретического обоснования и разработки методов оценки уровня продовольственной безопасности и средств на ее обеспечение. Предлагаемые в работе универсальный, нормированный показатель продовольственной безопасности и методика его расчета позволят решить эту задачу. Более того, с его помощью легко формализуется задача управления продовольственными запасами в виде государственного, регионального или частного резерва. Если же определять доступность или обеспеченность продовольствием через цены на продукты, то представляется возможность формализовать задачу формирования и управления политикой цен на продукты для населения.

Ключевые слова: продовольствие, безопасность, вероятность, нормирование, обеспечение, импортозамещение.

Abstract. Food security is a key public security issue. It is implemented by public and private food supply systems. The choice of the best option for this system is an important technical and economic task. Its solution is impossible without theoretical justification and development of methods for assessing the level of food security and the means to ensure it. The universal, standardized indicator of food security and the methodology of its calculation proposed in this work will solve this problem. Moreover, with its help, the task of managing food stocks in the form of a state, regional or private reserve is easily formalized. If we determine the availability or availability of food through food prices, then it will be possible to formalize the task of creating and managing a food price policy for the population.

Keywords: food, security, probability, standardization, provision, import substitution.

Введение

Продовольственная безопасность – это элемент национальной безопасности государства [1, 2]; ситуация, при которой все люди в каждый момент времени имеют физический и экономический доступ к достаточной в количественном отношении безопасной пище, необходимой для ведения активной и здоровой жизни. Безопасность является важным свойством систем обеспечения продо-

вольствием. Изучение методов ее оценки в разных областях науки, техники, экономики, экологии, жизнедеятельности и т.д. показало, что нет общепринятых формализованных стандартов и соответствующих показателей. В каждой области это делается по своим, отраслевым методикам. Как правило, безопасность рассматривается в виде набора индикаторов, характерных для своей области применения [1–6]. В технике это вероятностные оценки поведения систем [7–9, 11]. В экономике, безопасности жизнедеятельности и сельском хозяйстве [2–7] приняты специальные наборы значений характерных факторов. Удивительно, но в системной инженерии безопасность не принята как показатель качества систем [10]. На сколько запутана проблема, достаточно посмотреть ссылку на определение экономической безопасности [1–6]. Все это приводит к проблемам в сравнительном анализе средств защиты продовольственных систем и стратегий их применения. Продовольственная безопасность относится к общей проблеме экономической безопасности. Обоснование, выбор и методы применения обобщенного показателя продовольственной безопасности на примере системы продовольственного обеспечения есть задача этой работы.

Основная часть

Безопасность – это состояние объекта, в котором он либо не подвергается негативному воздействию, либо успешно противостоит такому воздействию, продолжая нормально функционировать «наиболее привлекательно и полно, т.к. оно отражает свойства окружающей среды и самой системы, которая функционирует в этой среде». В этом определении представляется возможность использования единого нормируемого показателя и вероятностной алгеброй его использования, изложенной в работе [12].

В такой формулировке воздействие внешней среды можно описать перечислением ее воздействий с соответствующими вероятностями наблюдения, т.е. вероятность различного вида нарушений обеспечения продовольствием

$$V_s = \{v_i, p(v_i), i = 1 \dots n\}, \quad (1)$$

где v_i – i -й вид нарушения; $p(v_i)$ – вероятность его наблюдения.

Свойство продовольственной системы противостоять внешним воздействиям или атакам можно охарактеризовать вероятностью сохранения заданного поведения при i -м нарушении обеспечения продовольствием, т.е. для множества внешних воздействий построить множество

$$Q = \{q(v_i), i = 1 \dots n\}. \quad (2)$$

По принятому определению безопасности для i -го нарушения, используя формулу полной вероятности, можно записать

$$P_s(v_i) = (1 - p(v_i)) + p(v_i)q(v_i), \quad (3)$$

где $P_s(v_i)$ – вероятность сохранения обеспечения продовольствием в заданном (рабочем) состоянии при возможном внешнем v_i – внешнем воздействии; $(1 - p(v_i))$ – вероятность отсутствия внешнего v_i воздействия; $p(v_i)q(v_i)$ – вероятность того, что внешнее воздействие происходит, но успешно отражается системой резервирования и обеспечения продовольствием.

Для всего множества внешних воздействий, когда любое нарушение обеспечения приводит к нарушению работоспособности продовольственной системы, формула ее полной безопасности будет иметь вид

$$P_s = \prod_i P_s(v_i) = \prod_i [1 - p(v_i)(1 - q(v_i))]. \quad (4)$$

Это будет справедливо, когда любое из перечисленных внешних воздействий приводит к нарушению заданного поведения системы. Но возможна и ситуация, когда к сбою поведения может привести только сочетание внешних атак, двух и более. Рассмотрим случай сочетания двух внешних событий.

Заметим, что: $1 - P_1(v_1)$ – вероятность нарушения безопасности первым воздействием; $1 - P_2(v_2)$ – вероятность нарушения безопасности вторым воздействием, тогда $(1 - P_1(v_1))(1 - P_2(v_2))$ –

будет вероятностью проявления нарушения безопасности первым и вторым воздействием. Следовательно, безопасность, обусловленная только воздействием двух видов угроз, будет равна

$$P_s(v_1, v_2) = 1 - (1 - P_1(v_1))(1 - P_2(v_2)). \tag{5}$$

После подстановок (3) эта формула будет иметь вид

$$P_s(v_1, v_2) = 1 - [p(v_1)p(v_2)(1 - q(v_1))(1 - q(v_2))]. \tag{6}$$

Для случая, когда для нарушения безопасности системы требуется m сочетаний угроз, формула (6) представляется в виде

$$P_s(v_1, \dots, v_m) = 1 - \prod_{i=1}^m p(v_i)(1 - q(v_i)). \tag{7}$$

Эта формула справедлива для оценки продовольственной безопасности системой обеспечения с резервированием, т.е. когда угрозам предстоит преодолеть несколько рубежей защиты продовольственной безопасности.

Если для продовольственной системы, подвергающейся n видам угроз и из них для поражения системы требуется сочетание каких-то m воздействий, то формула полной безопасности будет иметь вид

$$P_s(v_1, \dots, v_n) = [1 - \prod_{i=1}^m p(v_i)(1 - q(v_i))] \prod_{j=n-m}^n [1 - p(v_j)(1 - q(v_j))]. \tag{8}$$

Предлагаемый метод оценки позволяет проводить сравнение эффективности средств и систем обеспечения продовольственной безопасности и выбирать лучшую из них.

В качестве примера рассмотрим оценку безопасности каким-то условным продуктом питания Π .

Известно, что он поставляется из-за рубежа и частично замещается внутренним производством в соотношении: $\Pi_e = 0,7$ и $\Pi_c = 0,3$, т.е. доля внешних поставок составляют 0,7, а внутреннего замещения равна 0,3.

В вероятностной формализации определим $P(\Pi_e)$ как вероятность успешных, внешних поставок в соответствии с обязательствами. А вероятность $P(\Pi_c)$ – как вероятность удовлетворения потребности этого продовольствия внутренним замещением. В рассматриваемом случае $P(\Pi_c) = 0,3$.

Тогда формула полной вероятности безопасности обеспечения этим продуктом будет иметь вид

$$P(\Pi) = P(\Pi_e) + (1 - P(\Pi_e)) P(\Pi_c). \tag{9}$$

Предположим, что внешний поставщик выполнит свои обязательства с вероятностью $P(\Pi_e) = 0,5$, тогда безопасность обеспечения этим видом продовольствия будет равна

$$P(\Pi) = 0,5 + (1 - 0,5) \cdot 0,3 = 0,65.$$

Это означает, что с вероятностью **0,65** будет обеспечено необходимое количество продовольствия.

Мерой достаточности продовольственного обеспечения принята продовольственная корзина с некоторым стандартным набором продуктов. Тогда безопасность системы продовольственного обеспечения населения будет вычисляться как вероятность наполнения этой корзины. Для набора из k -продуктов эта вероятность будет вычисляться по формуле

$$P_s(k) = \prod_{i=1}^k P_s(v_i) = \prod_{i=1}^k [1 - p(v_i)(1 - q(v_i))]. \tag{10}$$

Оптимальная система обеспечения продовольствием может быть выбрана из принципа

$$opt\{v_1, v_2, \dots, v_i \dots v_N\} = \arg \max_{v_i} P_s(N) = \arg \max_{v_i} \prod_{i=1}^N [1 - p(v_i)(1 - q(v_i))], \tag{11}$$

где $opt\{v_1, v_2, \dots, v_i \dots v_N\}$ – оптимальный в смысле безопасности набор продовольствия; N – число продуктов, необходимых для нормального обеспечения населения.

Заключение

1. Предлагаемые критерии и метод могут быть использованы как нормированный показатель безопасности обеспечения продовольствием и внесен в соответствующие стандарты, а метод – как стандартная методика оценки эффективности их защиты.

2. Критерий оценки позволяет оценивать эффективность и сравнивать различные системы обеспечения продовольствием путем оптимизации продовольственной безопасности.

3. Значения вероятности успешного обеспечения продовольствием **Р(П)** достаточно просто согласовываются с затратами на безопасность и расходами на ее поддержание, что позволяет перейти к решению задач технико-экономической реализации оптимальной системы продовольственной безопасности.

Работа выполнена по гранту РФФИ 18-29-03056 «Оценка информационной и экономической безопасности методами машинного обучения в информационном пространстве цифровой экономики».

Библиографический список

1. Экономическая безопасность России: Общий курс : учебник / под ред. В. К. Сенчагова. – 2-е изд. – Москва : Дело, 2005. – 896 с.
2. Макарова, Е. Н. Критерии и показатели оценки уровня экономической безопасности коммерческого банка / Е. Н. Макарова // Образование и наука без границ: социально-гуманитарные науки. – 2017. – № 6. – С. 186–190.
3. Асадова, А. А. Количественные методы оценки экономической безопасности предприятий / А. А. Асадова // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. – 2017. – № 3 (33). – С. 23–28.
4. Корнилов, М. Н. Экономическая безопасность : учеб. пособие / М. Н. Корнилов, И. В. Юшин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : РГ-Пресс, 2019. – 320 с.
5. Корзаева, Н. Н. Экономическая безопасность : учеб. пособие / Н. Н. Корзаева, А. С. Бабанская. – Москва : Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. – 245 с.
6. Продовольственная безопасность России и ведущих стран мира : аналит. обзор / А. Л. Аронов, Т. П. Нино, Т. А. Суркова, Е. А. Вернер, А. А. Королько. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 124 с.
7. Ветошкин, А. Г. Нормативное и техническое обеспечение безопасности жизнедеятельности : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин. – Москва : Инфра-инженерия, 2017. – 417 с.
8. Северцев, Н. А. Введение в безопасность / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : ТЕИС, 2008. – 177 с.
9. Северцев, Н. А. Разработка вероятностных критериев безопасного управления объектами специальной техники / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2. – С. 3–8.
10. Косяков, А. Системная инженерия. Принципы и практика : пер. с англ. / А. Косяков, С. М. Бимер, С. Дж. Сеймур, У. Н. Свит. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 625 с.
11. Воронин, Е. А. Выбор и обоснование критерия оценки и нормирования безопасности мероприятий и систем различного назначения / Е. А. Воронин, К. Т. Нгуен // Научно-технические технологии. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 17–19.

References

1. *Ekonomicheskaya bezopasnost' Rossii: Obshchiy kurs: uchebnik* [Economic security of Russia: General course: textbook]. Ed. by V. K. Senchagov. 2nd ed. Moscow: Delo, 2005, 896 p. [In Russian]
2. Makarova E. N. *Obrazovanie i nauka bez granits: sotsial'no-gumanitarnye nauki* [Education and science without borders: social and humanitarian Sciences]. 2017, no. 6, pp. 186–190. [In Russian]
3. Asadova A. A. *Teoriya i praktika servisa: ekonomika, sotsial'naya sfera, tekhnologii* [Theory and practice of service: economy, social sphere, technology]. 2017, no. 3 (33), pp. 23–28. [In Russian]
4. Kornilov M. N., Yushin I. V. *Ekonomicheskaya bezopasnost': ucheb. posobie* [Economic security: textbook]. 3rd ed., rev. and suppl. Moscow: RG-Press, 2019, 320 p. [In Russian]
5. Korzaeva N. N., Babanskaya A. S. *Ekonomicheskaya bezopasnost': ucheb. posobie* [Economic security: textbook]. Moscow: Izd-vo RGAU-MSKhA, 2016, 245 p. [In Russian]
6. Aronov A. L., Nino T. P., Surkova T. A., Verner E. A., Korol'ko A. A. *Prodovol'stvennaya bezopasnost' Rossii i vedushchikh stran mira: analit. obzor* [Food security in Russia and the leading countries of the world: analytical review]. Moscow: FGNU «Rosinformagrotekh», 2005, 124 p. [In Russian]
7. Vetoshkin A. G. *Normativnoe i tekhnicheskoe obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: ucheb. posobie* [Normative and technical support of life safety : textbook]. Moscow: Infra-inzheneriya, 2017, 417 p. [In Russian]

8. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Vvedenie v bezopasnost'* [Introduction to security]. Moscow: TEIS, 2008, 177 p. [In Russian]
9. Severtsev N. A., Betskov A. V., Dar'ina A. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2, pp. 3–8. [In Russian]
10. Kosyakov A., Bimer S. M., Seymour S. Dzh., Svit U. N. *Sistemnaya inzheneriya. Printsipy i praktika: per. s angl.* [System engineering. Principles and practice: translation from English]. Moscow: DMK Press, 2017, 625 p. [In Russian]
11. Voronin E. A., Nguen K. T. *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technology]. 2018, vol. 19, no. 4, pp. 17–19. [In Russian]

Воронин Евгений Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
отдел управления робототехническими
устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской Академии Наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: e.voronin1@gmail.com

Voronin Evgeniy Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
department of control of robotic devices,
Federal Research Center «Computer science
and control» of the Russian Academy of Sciences
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Воронин, Е. А. Оценка и выбор систем безопасности обеспечения продовольствием / Е. А. Воронин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 2 (30). – С. 124–128. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-2-13.