

# АНАЛИЗ ГОТОВНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Г. Н. Мальцев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

Д. В. Склемин<sup>а</sup>, адъюнкт

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в современных условиях использование информационных технологий поддержки жизненного цикла является одним из ключевых факторов поддержания высокой надежности и готовности к применению сложных наукоемких технических систем на этапе их эксплуатации. **Цель:** анализ готовности сложных технических систем на основе описания в пространстве состояний процесса их эксплуатации с учетом использования технологий информационной поддержки жизненного цикла. **Результаты:** разработана марковская модель изменения состояний сложной технической системы на этапе эксплуатации и проведено исследование ее готовности в зависимости от значений показателей, характеризующих переходы из одного состояния в другое, с учетом внедрения информационной поддержки эксплуатационных процессов. Анализ изменения коэффициента готовности сложной технической системы показал увеличение ее готовности при внедрении технологий информационной поддержки жизненного цикла на этапе эксплуатации. **Практическая значимость:** показаны возможности повышения готовности сложных технических систем на основе внедрения технологий информационной поддержки жизненного цикла. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании средств информационной поддержки жизненного цикла сложных технических систем на этапе эксплуатации, организации и планирования эксплуатационных процессов.

**Ключевые слова** — сложные технические системы, технологии информационной поддержки жизненного цикла изделия, эксплуатация, коэффициент готовности.

## Введение

Поддержание высокой надежности сложных технических систем (СТС) является одной из основных задач при организации их эксплуатации. В общем случае надежность СТС определяется, прежде всего, эксплуатационным качеством входящих в ее состав аппаратно-программных средств, которое закладывается в них при проектировании и производстве. Однако на последующих этапах жизненного цикла (ЖЦ) СТС ее надежность и безотказность существенным образом зависят от принятой системы технической эксплуатации. В современных условиях одним из основных направлений совершенствования системы эксплуатации наукоемких технических объектов (изделий), к числу которых относится большинство СТС, используемых в аэрокосмической, телекоммуникационной, энергетической и других отраслях, является реализация информационной поддержки эксплуатационных процессов как составной части процесса информационной поддержки ЖЦ СТС [1, 2].

Разработка и внедрение технологий информационной поддержки ЖЦ СТС базируются на использовании современных информационных и телекоммуникационных технологий. Они являются основой реализации так называемых технологий CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) или технологий информационной поддержки ЖЦ изделия (ИПИ). Несмотря

на большое количество публикаций на данную тему, внимание в них, в основном, уделяется информационной поддержке разработки и производства СТС [1–4]. В тех же работах, в которых рассматривается применение ИПИ-технологий на этапе эксплуатации СТС [5–7], нет оценки влияния внедрения ИПИ-технологий на показатели эффективности системы эксплуатации СТС. В данной статье на основе моделирования процесса эксплуатации СТС в пространстве состояний проводится анализ комплексного показателя их надежности — коэффициента готовности — с учетом использования ИПИ-технологий.

## Общая характеристика ИПИ-технологий и особенности их применения на этапе эксплуатации технических систем

Концепция CALS/ИПИ объединяет принципы и технологии информационной поддержки наукоемких изделий на всех стадиях их ЖЦ. Основой концепции является использование интегрированной информационной среды, обеспечивающей единообразные способы управления процессами, и взаимодействие всех участников ЖЦ (заказчиков и поставщиков продукции; эксплуатационного и ремонтного персонала). Концепция реализуется в соответствии с требованиями системы стандартов.

Четыре базовых принципа совокупности ИПИ-технологий по отношению к СТС, являю-

щимися наукоемкими изделиями, в техническом плане таковы [1, 2]:

1) цифровая форма представления данных о технических объектах;

2) хранение и передача данных в электронном виде в соответствии с принятыми стандартами;

3) использование единого информационного пространства для всех участников ЖЦ технического объекта;

4) обновление и дополнение информации о техническом объекте на каждом этапе его ЖЦ.

Реализация этих принципов предполагает интеграцию информационных событий, протекающих в ходе ЖЦ СТС, в высокоавтоматизированный процесс, в котором хранение информации и управление документооборотом, сопровождающие ее жизненный цикл, осуществляется в электронном виде в едином информационном пространстве с соответствующим программным обеспечением.

На различных стадиях ЖЦ СТС для информационной поддержки принятия конструкторских и управленческих решений в рамках реализации ИПИ-технологий применяются различные программные средства. Их разработка осуществляется многопрофильными рабочими группами, объединяющими экспертов различных специальностей. Нормативную базу разработок составляют международные и национальные стандарты, регламентирующие различные аспекты ИПИ-технологий. К числу программных средств реализации ИПИ-технологий относятся: автоматизированные системы конструкторского и технологического проектирования, программные средства управления данными об изделиях, автоматизированные системы планирования и управления производством и предприятием, программно-методические средства анализа логистической поддержки и ведения баз данных, программные средства управления потоками работ, программные средства моделирования и анализа бизнес-процессов и др.

Для реализации информационной поддержки процесса эксплуатации СТС в рамках реализации ИПИ-технологий применяется системная организация постпроизводственных процессов ЖЦ изделий, которая обеспечивается программно-методическими средствами анализа логистической поддержки и ведения баз данных по результатам такого анализа.

Процессы, составляющие структуру системы интегрированной логистической поддержки, разделены на две группы [2, 8]. В первую группу входят процессы, непосредственно связанные с информационной поддержкой технической эксплуатации и применения изделия по назначению.

*Анализ логистической поддержки* — это технология исследования изделия, вариантов системы

его эксплуатации и информационной поддержки эксплуатации. Она направлена на снижение затрат на ЖЦ изделия при обеспечении требуемых параметров безотказности, долговечности, ремонтпригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности. При проведении анализа логистической поддержки формируется интегральный показатель (функционал), характеризующий эффективность системы интегрированной логистической поддержки (пригодность к поддержке) и учитывающий следующие эксплуатационно-технические характеристики изделия: наработку на отказ, среднее время восстановления (приведения в рабочее состояние) после отказа, среднее время между техническим обслуживанием (ТО), среднее время между заменами, средний срок работы до ремонта, требуемый уровень готовности, требуемый уровень обслуживания.

*Планирование и управление ТО изделия* предполагает разработку концепции ТО, анализ и конкретизацию требований к изделию в части его ТО, разработку и оперативную корректировку планов ТО. Выбирая соответствующий метод ТО изделий, можно рассчитать его периодичность, объем, определить перечень необходимого оборудования и эксплуатационно-технической документации, количество и квалификацию персонала, необходимого для проведения ТО. Требования к изделию в отношении ТО определяются на основе содержащихся в базе данных анализа логистической поддержки и уточняются по результатам эксплуатации изделия. В базе данных содержится информация о конкретном изделии в целом, его отдельных элементах (подсистемах), а также об опыте эксплуатации изделий-аналогов, в которых используются такие же элементы (подсистемы).

*Мониторинг технического состояния изделия и процессов эксплуатации* неразрывно связан с организацией сбора сведений об отказах конкретного изделия, а также изделий-аналогов. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется типом изделия и особенностями его эксплуатации. Источниками статистической информации являются сведения, полученные по результатам различных видов испытаний и эксплуатации, которые заносятся в общую базу данных изделия в электронном виде посредством передачи информации через объединенную информационную сеть. По результатам мониторинга технического состояния изделия и процессов его эксплуатации осуществляется определение средствами технического диагностирования остаточного ресурса и предотказного состояния изделия. При этом изучение особенностей и условий проявления отказов дает возможность использовать накопленные данные для проектирования будущих изделий.

Во вторую группу входят процессы, соответствующие различным видам обеспечения технической эксплуатации и применения изделия по назначению.

*Планирование и управление материально-техническим обеспечением (МТО)* эксплуатации изделия включают в себя: кодификацию предметов поставки, определение параметров начального МТО, определение параметров текущего МТО, планирование поставок, управление поставками, управление заказами. Планирование и управление МТО позволяет достоверно оценивать текущее состояние изделий, обеспеченность процесса их эксплуатации техническими материальными средствами.

*Разработка и сопровождение эксплуатационной и ремонтной документации*, выполненной в электронном виде, является первичным этапом реализации интегрированной логистической поддержки. Эксплуатационная и ремонтная документация при использовании ИПИ-технологий разрабатывается в виде интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР), которые применяются обслуживающим персоналом в интерактивной форме прямого диалога пользователя с компьютером, что позволяет существенно снизить объем технической документации, повысить скорость поиска и наглядность отображения информации. ИЭТР включает в себя базу данных и электронную систему отображения, предназначенную для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем.

*Обеспечение специальным, вспомогательным и измерительным оборудованием*, необходимым для эксплуатации и обслуживания изделия, осуществляется в плановом порядке или по заявкам в соответствии с разработанными планами МТО эксплуатации изделия и планами его ТО.

*Планирование и организация обучения персонала* и разработка технических средств обучения обеспечивают правильную организацию эксплуатационных процессов и исключение влияния на них «человеческого фактора», обусловленного ошибочными действиями персонала. При этом разработка технических средств обучения и их использование при обучении и повышении квалификации обслуживающего персонала СТС представляет собой отдельную задачу и имеет самостоятельное значение [9].

На стадии эксплуатации одной из основных эксплуатационно-технических характеристик СТС является ее готовность — комплексная характеристика надежности, в большинстве случаев задаваемая техническими требованиями к СТС [10, 11]. Готовность технической системы характеризует ее способность находиться в работоспособном состоянии в заданный или про-

извольный момент времени функционирования. Данное свойство характеризует возможности перевода технической системы из любого исходного состояния в состояние непосредственного применения по назначению и поддержание ее в этом состоянии. Готовность, как комплексная характеристика надежности, в общем случае учитывает все составляющие технической системы: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость [11, 12].

Информационная поддержка эксплуатации СТС в конечном итоге направлена на поддержание и повышение ее готовности к применению. Комплекс проводимых при этом мероприятий в рамках реализации ИПИ-технологий осуществляется по двум основным направлениям — соблюдение правил и режимов эксплуатации СТС и восстановление работоспособного состояния СТС в случае отказов и неисправностей. Эти мероприятия реализуются с помощью процессов интегрированной логистической поддержки, объединенных в первую группу (процессы, непосредственно связанные с информационной поддержкой технической эксплуатации и применения изделия по назначению). Информационной основой этих мероприятий является ведение баз данных о конкретной СТС, совокупности эксплуатируемых СТС той же серии (проекта), а также об изделиях-аналогах. Сбор информации о ходе эксплуатации всех однотипных СТС позволяет набрать статистические данные, необходимые для правильного и оперативного принятия управленческих и прогностических решений при эксплуатации каждой СТС.

Анализ возможностей повышения готовности СТС при использовании ИПИ-технологий может быть проведен на основе моделирования процесса эксплуатации СТС в пространстве состояний. При этом наибольший практический интерес представляет учет влияния информационной поддержки эксплуатационных процессов на снижение временных расходов на устранение неисправностей и проведение мероприятий технической эксплуатации, что позволяет увеличить суммарное время нахождения СТС в состоянии готовности к применению и применения по назначению.

### **Марковская модель изменения состояний СТС на этапе эксплуатации с учетом использования ИПИ-технологий**

Большинство СТС являются восстанавливаемыми техническими средствами с длительными сроками эксплуатации, функционирующими в режиме непрерывного применения. Среди них можно выделить большое число средств, для которых данный режим предполагает поддержание

непрерывной готовности к применению, а сам процесс применения по назначению носит периодический (сеансный) характер, и для него характерны этапы нахождения СТС в дежурном режиме, в режиме подготовки и собственно в режиме применения по назначению [13, 14]. Система эксплуатации таких СТС предусматривает проведение ТО по календарному принципу или по наработке, в период которого применение СТС по назначению не предусматривается. Время, необходимое для проведения ТО, составляет плановые потери суммарного времени готовности СТС непрерывного применения. К невозможности применения по назначению приводят также отказы и неисправности СТС, время на устранение которых составляет внеплановые потери суммарного времени готовности СТС.

Реализация процессов анализа логистической поддержки, планирования и управления ТО изделия и мониторинга технического состояния изделия и процессов его эксплуатации позволяет снизить плановые и внеплановые потери суммарного времени готовности СТС. Повышение готовности СТС при этом характеризуется повышением коэффициента готовности  $K_r$ , который в общем случае определяется как вероятность того, что техническая система окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение технической системы по назначению не предусматривается [10, 12]. Для восстанавливаемых технических систем величина коэффициента готовности определяется соотношением между средним временем наработки на отказ  $T_o$  и средним временем восстановления  $T_b$ :

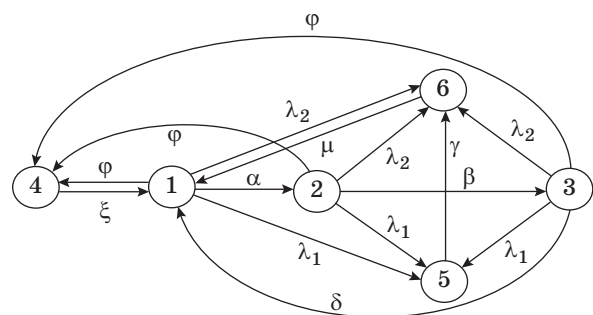
$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}. \quad (1)$$

Поскольку, по определению, коэффициент готовности  $K_r$  является вероятностью заставить систему в исправном состоянии в любой момент времени, он может быть найден в виде суммы вероятностей всех исправных состояний системы. Для СТС с сеансным режимом применения к этим состояниям относятся все работоспособные состояния СТС на интервале времени, когда осуществляется поддержание ее готовности к применению и применения по назначению. Это — состояния нахождения в дежурном режиме, подготовки к применению и применения по назначению. Описание переходов между этими состояниями и состояниями, в которых СТС неработоспособна и ее применение по назначению невозможно, производится на основе графа состояний и марковской модели переходов между состояниями.

Подход к анализу надежности технических систем с использованием марковских моделей

получает широкое распространение [10]. При известных допущениях о свойствах потоков отказов и восстановлений, описываемых марковскими случайными процессами, данный подход позволяет составить систему дифференциальных уравнений для вероятностей нахождения системы в различных состояниях и определить эти вероятности. Основу марковских моделей составляет граф дискретных состояний системы, который должен учитывать влияние всех существенных факторов на процесс эксплуатации анализируемой системы. В рассматриваемом случае анализа процесса эксплуатации СТС с учетом использования ИПИ-технологий граф состояний должен учитывать, с одной стороны, свойственную СТС сложность технического диагностирования при поиске и обнаружении неисправностей, с другой стороны, влияние информационной поддержки на оперативность поиска и устранения неисправностей и проведения мероприятий технической эксплуатации.

Граф состояний СТС, учитывающий отмеченные особенности процесса ее эксплуатации с использованием ИПИ-технологий, представлен на рис. 1. СТС может находиться в одном из следующих состояний: 1 — работоспособна, находится в дежурном режиме; 2 — работоспособна, готовится к применению по назначению; 3 — работоспособна, применяется по назначению; 4 — работоспособна, находится на ТО; 5 — неработоспособна, отказ не идентифицирован; 6 — неработоспособна, отказ идентифицирован. Введение двух последних состояний учитывает специфику СТС, связанную со сложностью процессов их технического диагностирования при поиске и обнаружении неисправностей, а также с отсутствием достаточной статистики и базы данных по отказам, по крайней мере на начальном периоде эксплуатации малосерийных высоконадежных СТС. Под состоянием неидентифицированного отказа в рассматриваемой модели понимается состояние, в котором неисправность, являющаяся причиной отказа, не обнаружена и (или) не определен



■ Рис. 1. Граф состояний СТС в режиме непрерывного применения

алгоритм ее устранения, а под состоянием идентифицированного отказа понимается состояние, в котором неисправность, являющаяся причиной отказа, обнаружена и определен алгоритм ее устранения.

Марковские модели надежности технических систем являются моделями с непрерывным временем. Переходы между состояниями графа состояний СТС, приведенного на рис. 1, характеризуются следующими интенсивностями:  $\alpha$  — поступления заявок на применение;  $\beta$  — подготовки к применению;  $\delta$  — применения;  $\lambda_1$  — неидентифицированных отказов;  $\lambda_2$  — идентифицированных отказов;  $\mu$  — восстановления;  $\gamma$  — распознавания неидентифицированных отказов;  $\varphi$  — проведения ТО;  $\xi$  — завершения ТО.

При определении возможных переходов СТС между введенными состояниями были сделаны следующие допущения.

1. Для проведения ТО технические системы выводятся из состояния применения по назначению и переводятся в дежурный режим, поэтому переход в состояние 4, как правило, происходит из состояния 1. Переходы в состояние 4 из состояний 2 и 3 введены формально для того, чтобы согласовать полученные результаты с общим выражением для коэффициента готовности (1), в котором среднее время наработки на отказ  $T_0$  соответствует нахождению СТС в одном из работоспособных состояний 1, 2, 3.

2. После завершения ТО переход из состояния 4 возможен только в состояние 1, поскольку после проведения ТО технические системы переводятся в дежурный режим и перед применением, как правило, проходят стадию подготовки. Для СТС подготовка к применению по назначению после проведения ТО выполняется в обязательном порядке.

3. При восстановлении работоспособности СТС переход в состояние 1 возможен только из состояния 6, поскольку восстановление возможно только после идентификации отказа, алгоритм устранения которого имеется в базе знаний. В то же время отказы в ходе эксплуатации СТС могут возникнуть в любом работоспособном состоянии: в дежурном режиме 1, при подготовке к применению 2, при применении по назначению 3. При этом в зависимости от того, идентифицированный или неидентифицированный отказ, происходит переход в состояние 5 или 6. После устранения отказа подготовка СТС к применению начинается заново, и переход из состояния 6 возможен только в состояние 1.

4. Интенсивность идентифицированных или неидентифицированных отказов при переходе в состояния 5 и 6 в течение ЖЦ СТС изменяется по мере накопления статистики и наполнения базы данных по отказам. Кроме того, возможные от-

казы выявляются в ходе проектирования и испытаний СТС, и алгоритмы их устранения имеются в эксплуатационно-технической документации. Поэтому можно полагать, что  $\lambda_1 < \lambda_2$ , и в процессе ЖЦ СТС интенсивность неидентифицированных отказов  $\lambda_1$  уменьшается, а интенсивность идентифицированных отказов  $\lambda_2$  увеличивается.

В соответствии с составленным графом состояний и введенными обозначениями процесс функционирования СТС в пространстве состояний описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{P}_1(t) = \xi P_4(t) + \mu P_6(t) + \delta P_3(t) - (\alpha + \varphi + \lambda_1 + \lambda_2) P_1(t) \\ \dot{P}_2(t) = \alpha P_1(t) - (\beta + \lambda_1 + \lambda_2 + \varphi) P_2(t) \\ \dot{P}_3(t) = \beta P_2(t) - (\delta + \lambda_1 + \lambda_2 + \varphi) P_3(t) \\ \dot{P}_4(t) = \varphi P_1(t) + \varphi P_2(t) + \varphi P_3(t) - \xi P_4(t) \\ \dot{P}_5(t) = \lambda_1 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) + \lambda_1 P_3(t) - \gamma P_5(t) \\ \dot{P}_6(t) = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_2 P_2(t) + \lambda_2 P_3(t) + \gamma P_5(t) - \mu P_6(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $P_1(t) \dots P_6(t)$  — вероятности нахождения СТС в момент времени  $t$  в состояниях 1–6 соответственно, удовлетворяющие условию нормировки  $\sum_{i=1}^6 P_i(t) = 1$ .

Система дифференциальных уравнений (2) составлена в соответствии с известным правилом Колмогорова. Для ее решения необходимо задание начальных условий  $P_1(0) \dots P_6(0)$  при  $t=0$ , при этом аналитическое решение в общем случае отсутствует. Поэтому для нахождения вероятностей  $P_1(t) \dots P_6(t)$  как функций времени и связанных с ними характеристик готовности анализируемой СТС необходимо использовать численное интегрирование. Аналитическое решение может быть получено для стационарного режима эксплуатации СТС как решение системы алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \xi P_4 + \mu P_6 + \delta P_3 - (\alpha + \varphi + \lambda_1 + \lambda_2) P_1 = 0 \\ \alpha P_1 - (\beta + \lambda_1 + \lambda_2 + \varphi) P_2 = 0 \\ \beta P_2 - (\delta + \lambda_1 + \lambda_2 + \varphi) P_3 = 0 \\ \varphi P_1 + \varphi P_2 + \varphi P_3 - \xi P_4 = 0 \\ \lambda_1 P_1 + \lambda_1 P_2 + \lambda_1 P_3 - \gamma P_5 = 0 \\ \lambda_2 P_1 + \lambda_2 P_2 + \lambda_2 P_3 + \gamma P_5 - \mu P_6 = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $P_1 \dots P_6$  — стационарные вероятности нахождения СТС в состояниях 1–6 соответственно, удовлетворяющие условию нормировки  $\sum_{i=1}^6 P_i = 1$ .

Система алгебраических уравнений (3) получена из системы дифференциальных уравнений (2) при  $\dot{P}_1(t) = \dots = \dot{P}_6(t) = 0$ , что соответствует стационарному режиму эксплуатации СТС при  $t \rightarrow \infty$ .

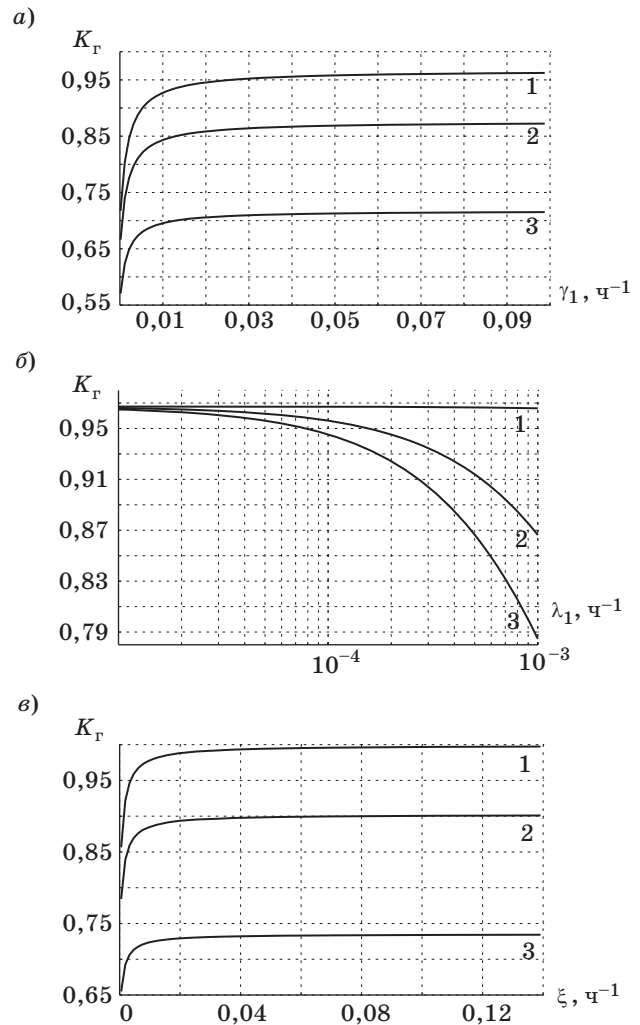
При сделанных предположениях системы уравнений (2) и (3) описывают марковскую модель изменения состояний СТС на этапе эксплуатации с учетом применения ИПИ-технологий.

### Результаты анализа готовности технических систем с учетом информационной поддержки эксплуатационных процессов

При описании процесса эксплуатации технических систем в пространстве состояний коэффициент готовности определяется как сумма вероятностей нахождения в работоспособных состояниях [10]. Для изображенного на рис. 1 графа состояний СТС работоспособными являются состояния 1, 2, 3, поэтому стационарный коэффициент готовности СТС определяется суммой вероятностей нахождения СТС в этих состояниях:  $K_r = P_1 + P_2 + P_3$ .

Результаты расчетов стационарного коэффициента готовности СТС при различных интенсивностях переходов между состояниями на основании решения системы уравнений (3) представлены на рис. 2, а–в. При задании интенсивностей переходов учитывалось применение ИПИ-технологий в виде интегрированной логистической поддержки эксплуатационных процессов, что позволяет оценить ее влияние на поддержание и повышение готовности СТС.

На рис. 2, а представлены расчетные зависимости коэффициента готовности  $K_r$  от интенсивности распознавания неидентифицированных отказов  $\gamma$  при различных интенсивностях восстановления  $\mu$ . Полагалось:  $\alpha = 0,4 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\beta = 4 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\delta = 1,33 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_1 = 5 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_2 = 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\varphi = 2,3 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\xi = 0,007 \text{ ч}^{-1}$ . Кривая 1 соответствует  $\mu = 2 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время восстановления системы 30 мин); кривая 2 —  $\mu = 0,0139 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время восстановления 3 сут); кривая 3 —  $\mu = 0,0042 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время восстановления 10 сут). Приведенные зависимости показывают, что уменьшение интенсивности распознавания неидентифицированных отказов  $\gamma$  приводит к уменьшению коэффициента готовности, особенно в области малых значений  $\gamma$ , в рассмотренных условиях — при  $\gamma < 0,02$ . При увеличении  $\gamma$  коэффициент готовности насыщается на некотором уровне, который зависит от интенсивности восстановления  $\mu$ . С увеличением интенсивности восстановления, что соответствует уменьшению времени поиска и устранения отказов, коэффициент готовности увеличивается, что естественно. Интегрированная логистическая поддержка



■ Рис. 2. Зависимость коэффициента готовности от интенсивностей переходов из состояния в состояние при различных интенсивностях восстановления (а), распознавания (б) и завершения ТО (в)

эксплуатации позволяет повысить как интенсивность распознавания неидентифицированных отказов  $\gamma$ , так и интенсивность восстановления  $\mu$ .

На рис. 2, б приведены расчетные зависимости коэффициента готовности  $K_r$  от интенсивности неидентифицированных отказов  $\lambda_1$  при различных интенсивностях их распознавания  $\gamma$ . Полагалось:  $\alpha = 0,4 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\beta = 4 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\delta = 1,33 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_2 = 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\varphi = 2,3 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\xi = 0,007 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\mu = 2 \text{ ч}^{-1}$ . Кривая 1 соответствует  $\gamma = 1 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время распознавания 1 ч), кривая 2 —  $\gamma = 0,008 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время распознавания 5 сут), кривая 3 —  $\gamma = 0,004 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время распознавания 10 сут). Приведенные зависимости показывают, что при малых значениях интенсивности неидентифицированных отказов коэффициент готовности СТС практически не изменяется. Увеличение интенсивности неидентифицированных отказов  $\lambda_1$  приводит к снижению

коэффициента готовности, которое тем существеннее, чем меньше интенсивность распознавания неидентифицированных отказов  $\gamma$ . В рассмотренных условиях при  $\gamma=1 \text{ ч}^{-1}$  изменение величины  $\lambda_1$  в широких пределах практически не влияет на величину  $K_r$ . Интегрированная логистическая поддержка эксплуатации позволяет уменьшить время обнаружения неидентифицированных отказов и тем самым увеличить интенсивность распознавания неидентифицированных отказов  $\gamma$ . Кроме того, по мере накопления статистики и наполнения базы данных по отказам интенсивность неидентифицированных отказов  $\lambda_1$  уменьшается, поскольку первоначально неидентифицированные отказы переходят в разряд идентифицированных.

На рис. 2, в представлены расчетные зависимости коэффициента готовности  $K_r$  от интенсивности завершения ТО  $\xi$  при различных интенсивностях восстановления  $\mu$ . Полагалось:  $\alpha=0,4 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\beta=4 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\delta=1,33 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_1=5 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_2=10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\varphi=2,3 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\gamma=2 \text{ ч}^{-1}$ . Кривая 1 соответствует  $\mu=2 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время восстановления 30 мин), кривая 2 —  $\mu=0,014 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время восстановления 3 сут), кривая 3 —  $\mu=0,004 \text{ ч}^{-1}$  (среднее время восстановления 10 сут). Приведенные зависимости иллюстрируют повышение коэффициента готовности за счет уменьшения времени восстановления работоспособности СТС при использовании ИПИ-технологий, поскольку интегрированная логистическая поддержка эксплуатации позволяет уменьшить время восстановления работоспособности при устранении отказов и тем самым увеличить величину интенсивности восстановления  $\mu$ .

Во всех рассмотренных случаях использование ИПИ-технологий проявляется в изменениях параметров марковской модели изменения состояний СТС, при которых обеспечивается повышение ее коэффициента готовности. Так, за счет того, что при использовании ИПИ-технологий обслуживающий персонал быстрее обнаруживает и устраняет неисправности, алгоритм устранения которых имеется в базе знаний, происходит снижение времени восстановления работоспособности СТС при устранении отказов. Этому способствует предусмотренное интегрированной логистической поддержкой эксплуатации использование интерактивных технических руководств, в которых содержится текстовая и графическая и мультимедийная информация о СТС, являющейся объ-

ектом эксплуатации, ее аналогах и прототипах с возможностью электронного поиска алгоритмов устранения отказов через указание их внешних признаков. Предельное значение коэффициента готовности  $K_r = \xi / (\xi + \varphi)$ , что соответствует выражению (1) при  $T_o = 1/\varphi$ ,  $T_B = 1/\xi$ .

Следует отметить, что ведение общей базы данных об отказах СТС и об алгоритмах их устранения с доступом к ней в интегрированной информационной среде является одним из базовых принципов логистической поддержки эксплуатации наукоемких СТС. При первичном выявлении неидентифицированного отказа для выработки алгоритма его устранения с привлечением разработчиков СТС может потребоваться значительное время. Однако после занесения признаков выявленного отказа и разработанного алгоритма устранения вызвавшей его неисправности в электронную базу знаний, которая доступна всем участникам эксплуатационных процессов, этот отказ переходит в разряд идентифицированного, и при последующих возникновениях время его обнаружения и устранения существенно уменьшается.

## Заключение

Типовые значения коэффициента готовности, задаваемые техническими заданиями при разработке СТС непрерывного применения с учетом плановых потерь суммарного времени готовности СТС на проведение ТО, как правило, лежат в диапазоне  $0,93 \div 0,97$ . Представленные результаты анализа готовности СТС при использовании ИПИ-технологий показывают, что в широком диапазоне изменения параметров эксплуатационных процессов внедрение ИПИ-технологий на этапе эксплуатации СТС позволяет повысить их коэффициент готовности в представляющей интерес области его значений.

Рассмотренная марковская математическая модель изменения состояний СТС на этапе эксплуатации в достаточной степени универсальна и позволяет исследовать эксплуатационные характеристики СТС с учетом влияния различных факторов, включая внедрение ИПИ-технологий в виде интегрированной логистической поддержки эксплуатации. Дальнейшим направлением исследования является разработка моделей прогнозирования технического состояния СТС с использованием ИПИ-технологий.

## Литература

1. Гольдин В. В., Журавский В. Г., Сарафанов А. В., Кофанов Ю. Н. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств. — М.: Радио и связь, 2002. — 379 с.

2. Норенков И. П., Кузьмин П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 320 с.  
3. Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф., Ибрагимов И. М., Никифоров А. Д. Информационная поддержка

жизненного цикла изделий машиностроения: принципы, системы и технологии CALS/ИПИ. — М.: Академия, 2007. — 304 с.

4. Жаднов В. В., Кофанов Ю. Н., Полесский С. Н. Автоматизация проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 2003. — 156 с.
5. Погорелов Г. И., Куликов Г. Г., Фатиков В. С., Багаева Ю. О. Информационная поддержка жизненного цикла электронных систем управления ГТД на этапе эксплуатации // Вестник УГАТУ. 2011. № 3. С. 33–41.
6. Кривошеев И. А. Опыт разработки и внедрения компонентов информационной поддержки проектирования, доводки и эксплуатации ГТД и ГТУ // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. № 4. С. 428–436.
7. Лахин О. И., Полников А. С., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Теория сложности и проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 4–11. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.4
8. Судов Е. В., Левин А. И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. — М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2002. — 130 с.
9. Дикарев В. А. Автоматизация тренажерной подготовки операторов радиоэлектронных объектов. — М.: ИПРЖР, 2002. — 168 с.
10. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.
11. Ковалев А. П. Формирование требований к надежности и системам эксплуатации распределенных комплексов. — СПб.: Оракул, 1999. — 104 с.
12. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. — 278 с.
13. Молотов Е. П. Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. — М.: Физматлит, 2004. — 256 с.
14. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. — М.: Наука, 2006. — 410 с.

UDC 004.896

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.38

### Analysis of Complex Technical System Availability using Information Technologies of Lifecycle Support

Maltsev G. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy\_maltsev@mail.ru

Sklemin D. V.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, dv\_sklemin@mail.ru

<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskiy Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** In modern conditions, the use of information technologies for lifecycle support is one of the key factors in maintaining the high reliability and availability of high-tech systems at the stage of their operation. **Purpose:** The goal is to analyze the availability of high-tech devices on the base of spatial description of their exploitation, taking into account the use of technologies for continuous information support of the life cycle. **Results:** A Markov model was developed for the change of states in a complex technical system during its operation, and its availability was studied, depending on the values of indicators characterizing the transitions from one state to another, taking into account the introduction of information support of the operational processes. The analysis of changes in the availability ratio of a complex technical system showed an increase in its availability when technologies of information support of the life cycle are introduced during the operational stage. **Practical relevance:** We have demonstrated the ways to increase the availability of complex technical systems by introducing technologies of information support of the life cycle. The obtained results can be used for developing life-cycle information support of complex technical systems at the stages of maintenance, organization and planning of the operational processes.

**Keywords** — Complex Technical Systems, CALS-Technologies, Maintenance, Availability Ratio.

### References

1. Gol'din V. V., Zhuravskii V. G., Sarafanov A. V., Kofanov Iu. N. *Informatsionnaia podderzhka zhiznennogo tsikla elektronnykh sredstv* [Information Support of Life Cycle of Electronic Means]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2002. 379 p. (In Russian).
2. Norenkov I. P., Kuz'min P. K. *Informatsionnaia podderzhka naukoemkikh izdelii. CALS-tehnologii* [Information Support of the Knowledge-intensive Products. CALS Technologies]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2002. 320 p. (In Russian).
3. Kovshov A. N., Nazarov Iu. F., Ibragimov I. M., Nikiforov A. D. *Informatsionnaia podderzhka zhiznennogo tsikla izdelii mashinostroeniia: printsipy, sistemy i tekhnologii CALS/IPI* [Information Support of Life Cycle of Products of Mechanical Engineering: Principles, Systems and CALS]. Moscow, Akademiia Publ., 2007. 304 p. (In Russian).
4. Zhadnov V. V., Kofanov Iu. N., Poleskii S. N. *Avtomatizatsiia proektnykh issledovaniy nadezhnosti radioelektronnoi apparatury* [Automation of Design Researches of Reliability of the Radio-electronic Equipment]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2003. 156 p. (In Russian).
5. Pogorelov G. I., Kulikov G. G., Fatikov V. S., Bagaeva Iu. O. *Informatsionnaia podderzhka zhiznennogo tsikla elektronnykh sistem upravleniia GTD na etape ekspluatatsii* [Information Support of Life Cycle of Electronic Control Systems of GTD at an Operational Phase]. *Vestnik UGATU*, 2011, no. 3, pp. 33–41 (In Russian).
6. Krivosheev I. A. *Opyt razrabotki i vnedreniia komponentov informatsionnoi podderzhki proektirovaniia, dovodki i ekspluatatsii GTD i GTU* [Experience of Development and Deployment of Components of Information Support of Design, Operational Development and Operation of GTD and GTU]. *Izvestiia Samarского nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, no. 4, pp. 428–436 (In Russian).
7. Lakhin O. I., Polnikov A. S., Simonova E. V., Skobelev P. O. Complexity Theory and Challenges of Aerospace Products Lifecycle Management. *Informatsionno-upravliaiushchie*



- sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 1 (74), pp. 4–12 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.4
8. Sudov E. V., Levin A. I. *Kontsepsiia razvitiia CALS-tehnologii v promyshlennosti Rossii* [The Concept of Development of CALS Technologies in the Industry of Russia]. Moscow, NITs CALS-tehnologii "Prikladnaia logistika" Publ., 2002. 130 p. (In Russian).
  9. Dikarev V. A. *Avtomatizatsiia trenazhernoii podgotovki operatorov radioelektronnykh ob'ektov* [Automation of Training Training of Operators of Radio-Electronic Objects]. Moscow, IPRZhR Publ., 2002. 168 p. (In Russian).
  10. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Bases of the Theory of Reliability]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2006. 704 p. (In Russian).
  11. Kovalev A. P. *Formirovanie trebovanii k nadezhnosti i sistemam ekspluatatsii raspredelennykh kompleksov* [Formation of Requirements to Reliability and Systems of Operation of the Distributed Complexes]. Saint-Petersburg, Orakul Publ., 1999. 104 p. (In Russian).
  12. Riabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem* [Reliability and Safety of Structural and Difficult Systems]. Saint-Petersburg, SPbGU Publ., 2007. 278 p. (In Russian).
  13. Molotov E. P. *Nazemnye radiotekhnicheskie sistemy upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Land Radio Engineering Control Systems of Spacecrafts]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 256 p. (In Russian).
  14. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellektual'nye tehnologii monitoringa i upravleniia strukturnoi dinamikoii slozhnykh tehnikeskikh ob'ektov* [Intellectual Technologies of Monitoring and Management of Structural Dynamics of Difficult Technical Objects]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 410 p. (In Russian).

#### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.