

УДК 629.735.083.06

В.М. Воробьев

ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ СИСТЕМНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА “ЭКИПАЖ - ВОЗДУШНОЕ СУДНО - СРЕДА”

На основании современных представлений о надежности сложных систем разработана и широко обсуждена новая концепция повышения системной эффективности конечного звена в безопасности полетов “экипаж – воздушное судно – среда”. Ее положения базируются на методологии системного подхода, современных информационных технологиях, обобщении опыта эксплуатации авионики на базе интегральных модульных конструкций и нормативно-технической документации.

Эффективность функционирования системы “экипаж – воздушное судно (ВС) – среда” как конечного звена в безопасности полетов в значительной степени определяется внедрением новых информационных технологий и возможностями бортового оборудования на базе интегральной модульной авиационной электроники (авионики) ИМА [1, 2]. В связи с этим необходимо упорядочить систему наших взглядов на проблемы повышения системной эффективности и надежности сложных систем, методологию взаимодействия эргатической системы с ее составляющими и другими пересекающимися вопросами, такими, как системная эффективность, деструктуризация систем, реконфигурация структур, программированная эксплуатация, резервирование, интегрированная автоматизированная система управления (ИАСУ).

Суть проблемы заключается в раскрытии внутренних свойств систем и процессов на жизненном цикле (ЖЦ) при соответствующих глобальных и локальных критериях оптимизации, ограничениях, методах и средствах реализации, т.е. при использовании методологии системного подхода для структурирования слабоупорядоченных логико-динамических систем. В мировом авиационном накоплен и систематизирован обширный материал по надежности функционирования ВС и систем в ожидаемых и экстремальных условиях эксплуатации, в том числе и комплекса “экипаж – ВС – среда”.

Необходимо углубить наши представления о многообразии процессов и систем, об общности научных положений и выработать концептуальное решение о природе отказов в человекомашинных системах, о множестве технических состояний (ТС) на интервале ЖЦ и об условиях эксплуатации (от исправного ТС) - через работоспособное – к отказанному ТС), т.е. *определить своеобразный уровень деградации системы.*

Не вдаваясь в терминологическую полемику о развитии основных понятий надежности сложных систем, будем опираться на конкретную нормативно-техническую базу, документацию передовых авиакомпаний мира и реалии в обеспечении эквивалентных (предельно реализуемых) свойств систем.

За количественную меру эффективности функционирования при выполнении сложной системой суммы частных задач (режимов) принято выражение

$$E(t) = \sum_{i \in \Phi} H_i \Phi_i \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n P H_i \Phi_i, \quad (1)$$

где H_i – возможные состояния функциональных систем; $P(H_i)$ – вероятность нахождения систем в состоянии H_i ; Φ_i – выходной эффект или уровень выполнения системой общей задачи, т.е. уровень качества функционирования системы.

Под **системной эффективностью** [1] понимается обобщенная совокупность свойств полиэргатических систем “экипаж – ВС – среда”, “экипаж – функциональная система”, оцениваемых показателями: строения, надежности и функционирования, адаптации и развития в структурах ЖЦ при ограничениях на системные ресурсы и реализующих свои возможности в условиях программированной эксплуатации.

Под **программированной эксплуатацией** [1] понимается логически обоснованная последовательность реализации функции системы как информационной категории систем автоматического проектирования, диагностики, прогнозирования, контроля, самодиагностики в соответствии со стадиями ЖЦ: (проектирование) > (серийное производство) > (эксплуатация).

Реализовывать основные принципы системного подхода в наукоемкой проблеме авиастроения возможно на основе концепции, высказанной академиком В.М. Глушковым “...как привнесение результатов из настоящего в будущее, с учетом прошлого” и развитой в работах академика В.И. Скурихина как принцип четырех “И”: интеграция, индивидуализация, информатизация, интеллектуализация. Это возможно осуществить на основе создаваемой ИАСУ авиапредприятиями на базе программированной эксплуатации. Комплекс взаимодействующих структур, коллективов и среды (“экипаж – ВС – среда”) является конечным звеном в безопасности полетов и показателем уровня (совершенства) его функционирования. Таким комплексным показателем эффективности [1] принята **вероятность благополучного исхода полета** $P_{\text{бип}}(t)$. Временная зависимость надежностных свойств (1) подчеркивает, в том числе, моменты возникновения особых случаев полета, включая этапы полета (взлет, полет по маршруту, посадка):

$$P_{\text{бип}}(t) = \sum_{a=1}^b P_{\text{отк}}(t) \sum_{c=1}^d P_{\text{овв}}(t) \sum_{m=1}^n P_{\text{эф}}(t), \quad (2)$$

где $P_{\text{отк}}(t)$, $P_{\text{овв}}(t)$, $P_{\text{эф}}(t)$ – вероятности событий соответственно: отказоустойчивости функциональных систем (ФС); живучести, оцениваемой вероятностью непопадания в условия опасных внешних воздействий (ОВВ), т.е. экстремальными условиями применения; отказобезопасности как показателя надежности комплекса “экипаж – ВС – среда”; a , b – виды и сочетания отказов авиационного оборудования; c , d – типы и виды ОВВ; m , n – действия экипажа и автоматических систем при локализации ситуаций.

Под **отказоустойчивостью** [1, 3] понимается комплексный показатель надежности ФС, определяемый вероятностью того, что система будет функционировать на определенном уровне качества после того, как произойдет отказ (или несколько отказов) в компонентах аппаратуры и (или) программного обеспечения.

Отказобезопасность [1] – комплексный показатель эргатической системы, определяемый вероятностью того, что неблагоприятное воздействие одного или нескольких факторов на функционирование системы будет парироваться полностью или частично воздействием человеко-машинной системы за определенное время.

Стабильность отказобезопасности – комплексный показатель надежности эргатической системы, определяемый вероятностью того, что характеристики отказобезопасности человеко-машинной системы остаются стабильными на определенном режиме функционирования авиационного оборудования и отрезке времени за счет

использования технологической системы поддержания ТС эргатической системы, глубины знаний и совершенствования операторских навыков личного состава.

Отказобезопасность как вероятность того, что конечное звено в безопасности полетов “экипаж – ВС - среда” справится с заданием на каком-либо уровне качества при действии отказов технических систем, возникновении ОВВ и действий других факторов (надежность функционирования служб обеспечения безопасности полетов и т.д.), в значительной степени зависит от действия и уровней этих факторов, а также способности системы “экипаж – ВС – среда” выполнить функцию управления и контроля на необходимом уровне.

Таким образом, эффективность функционирования системы “экипаж – ВС – среда” в значительной степени определяется следующими факторами: собственными возможностями влияния на свойства системы других факторов, т. е. потока отказов и их сочетаний техники; ОВВ и характеристик служб обеспечения безопасности полетов. Другими словами, отказобезопасность является доминирующим фактором – показателем надежности функционирования, обладающим свойствами **репрезентативности, интеграции и целостности выполнения функций ВС и систем.**

Для этапа функционирования наиболее важными показателями надежности восстанавливаемых систем (ГОСТ 27.002–89) являются: вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка до отказа, средняя наработка до отказа, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов, параметр потока отказов, усредненный параметр потока отказов. Они характеризуют показатели безотказности. К показателям долговечности относятся: гамма-процентный ресурс, средний ресурс, гамма-процентный срок службы, средний срок службы. Показателями ремонтпригодности является: вероятность восстановления, интенсивность восстановления, гамма-процентное время восстановления, среднее время восстановления, средняя трудоемкость восстановления. К комплексным показателям надежности согласно ДСТУ 3589–97 [1] относятся: отказобезопасность, стабильность отказобезопасности, отказоустойчивость, вероятность благополучного исхода полета, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности.

Согласно выражению (2) комплексный показатель эффективности функционирования системы “экипаж – ВС – среда” объединяет независимые события, включающие в себя: надежность работы ФС, действие ОВВ, качество функционирования эргатических систем. Эти события только в первом приближении отнесены к группе независимых, что обусловлено трудностью установления корреляционных связей в реальной обстановке. Действительно, на эффективность функционирования, выражаемую через $P_{\text{бип}}(t)$, влияют сложные процессы, сопутствующие ТС систем; условия их эксплуатации (ожидаемые и экстремальные); характеристики системы “экипаж – ВС – среда”, определяемые целым комплексом различных свойств и требований (психофизиологические нагрузки экипажа, возможности техники и экипажа в данной ситуации, своевременность оценки события, характеристики аэродинамики, прочности и т.д.).

Уровни допустимых по ЕНЛГС [2] вероятностей возникновения особых полетных ситуаций определяются значениями:

- отказа функциональной системы - $Q_{\text{фс}} \leq 10^{-7}$ 1/ч;
- усложнения условий полета - $Q_{\text{ууп}} < 10^{-3}$ 1/ч;
- сложной ситуации - $Q_{\text{сс}} \leq 10^{-5}$ 1/ч;

- аварийной ситуации – $Q_{ac} \leq 10^{-6}$ 1/ч;
- катастрофической ситуации – $Q_{kc} < 10^{-7}$ 1/ч.

Для придания конструктивного содержания методике сертификации оборудования, ВС и системы “экипаж – ВС – среда” показатели надежности этих составляющих необходимо структурировать. При декомпозиции на общую цель – обеспечение требуемой вероятности благополучного исхода полета, т. е. составляющих надежности звеньев этой сложной цепи, необходимо представить процесс в виде физической реализации надежности ее звеньев.

Отказобезопасность как комплексный показатель надежности и эффективности функционирования системы “экипаж – ВС – среда” определяет проблему – цели исследований. На первом уровне (подпроблемы исследований) располагаются свойства этой системы: отказоустойчивость, живучесть, показатели надежности систем “экипаж – ВС – среда”, “экипаж – авионика – среда”, “экипаж – авиационное оборудование – среда”, а также другие составляющие надежности (надежность функционирования служб обеспечения безопасности полетов и т.д.).

На втором уровне проблемы (формирование показателей надежности составляющих звеньев) определяются математическая и физическая интерпретации с учетом существующей научно-технической документации, опыта эксплуатации и использования новых технологий.

Показатели надежности составляющих звеньев выражают:

- отказоустойчивость ФС через показатели надежности аппаратуры и программного обеспечения;
- живучесть системы через показатели степени опасности и повреждаемости, их виды, сочетания и степень локализации действиями экипажа, службами обеспечения безопасности полетов и другими системами;
- собственно отказобезопасность систем “экипаж – ВС – среда”, “экипаж – авионика – среда”, “экипаж – авиационное оборудование – среда” через показатели надежности экипажа и индивидуально его членов и стабильность отказобезопасности (устойчивость навыков и знаний экипажа и его членов в процессе функционирования).

На третьем уровне проблемы (формирование методик, моделей, алгоритмов, программ) определяются показатели надежности составляющих звеньев, которые выглядят следующим образом.

Показатели надежности аппаратуры: безотказность, долговечность, целостность, готовность, ремонтпригодность, контролепригодность, диагностируемость, самодиагностируемость, сохраняемость и т.д.

Показатели надежности программного обеспечения: выполнение функций реконфигурации структур, интеграции, разделения, контроля, диагностики, прогнозирования, самоконтроля и т.д.

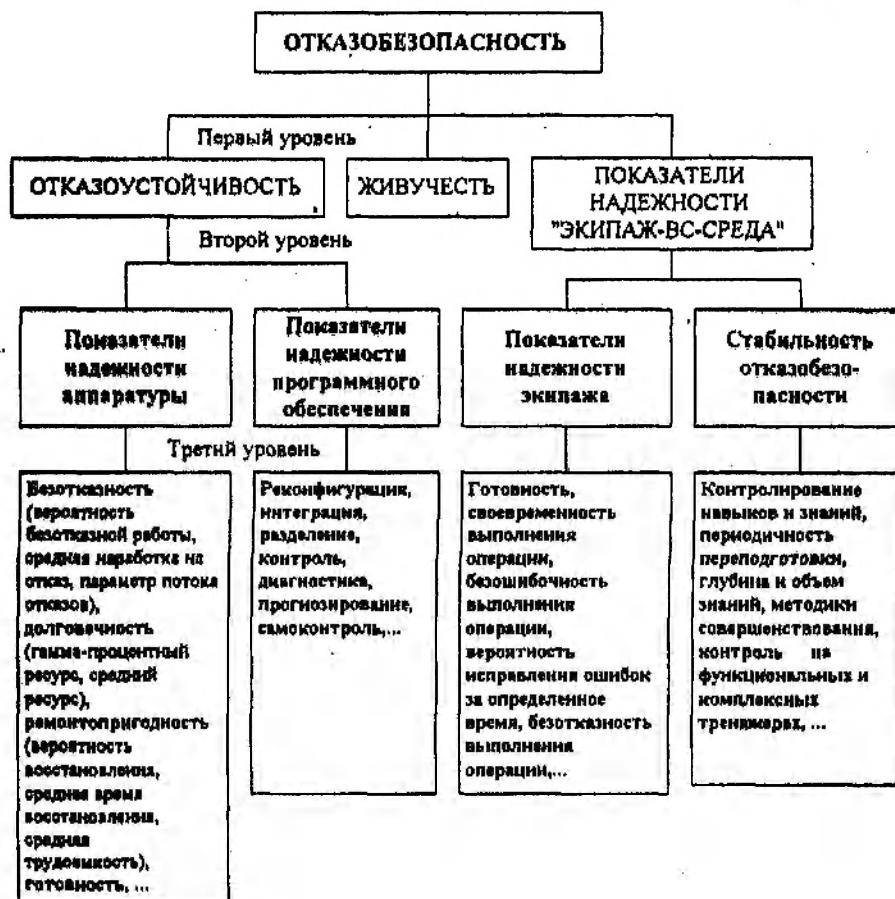
Показатели живучести: вероятность непопадания в соответствующие условия опасных внешних воздействий (сдвиг ветра, интенсивная грозовая деятельность, выкатывание ВС с взлетно-посадочной полосы, пожар на ВС, орнитологическая необеспеченность полетов), степень ухудшения аэродинамических, прочностных и других свойств ВС в процессе и после действия возмущений.

Показатели надежности функционирования систем “экипаж – ВС – среда”, “экипаж – авионика – среда”, “экипаж – авиационное оборудование – среда” выражаются через показатели надежности экипажа и его членов: готовность к выполнению операции,

своевременность выполнения операции, вероятность исправления ошибок за определенное время, безотказность, вероятность самоконтроля и др.

Стабильность отказобезопасности как комплексная характеристика систем "экипаж - ВС - среда", "экипаж - авионика - среда", "экипаж - авиационное оборудование - среда" обеспечивается комплексом организационно-технических и методических научных мероприятий через разработку методик и проведение экспериментов для контроля знаний и навыков, преимущественно "на земле", при переподготовке личного состава и исследованиях характеристик экипажа на опосредствованных устройствах. Показателями стабильности отказобезопасности могут быть: среднестатистические характеристики контролируемости знаний и навыков; периодичность переподготовки, их глубины и объема.

"Дерево" цели проблемы учитывает новые тенденции развития теории и практики создания и эксплуатации бортового оборудования и ВС, в том числе ВС с авионикой; использует фундаментальные основы эксплуатации бортового оборудования и ранее разработанные методологии и средства, но на более высоком уровне понимания процессов и свойств сложных систем, в том числе эргатических комплексов. Оно позволяет структурировать разрозненные сведения с позиции теории надежности сложных систем для обеспечения процессов проектирования, начиная с этапа замысла, а также этапов производства, эксплуатации и сертификации. По мере накопления опыта эксплуатации авионики появляется возможность дополнения и развития структуры системы повышения надежности и конечного звена в безопасности полетов "экипаж - ВС - среда" как важнейшего потенциального свойства сложных систем и процессов. "Дерево" цели показано на рисунке.



"Дерево" цели проблемы повышения надежности функциональных систем с авионикой и конечного звена в безопасности полетов "экипаж - ВС - среда"

Системная эффективность программированной эксплуатации (ОНТ) достигается за счет оптимального выбора единой совокупности свойств как создаваемых прогрессивных ОНТ, так и процессов и систем, их реализующих по всем этапам ЖЦ. Совершенствование и развитие ВС предусматривает усиление влияния системных методов комплексно-целевого планирования, оптимизации и управления на все завершающих этапах ЖЦ – серийного производства и эксплуатацию ВС.

Внедрение современных средств комплексной автоматизации на этапах ЖЦ требует непрерывного развития и совершенствования научных методов оптимизации и управления. Одной из основных задач деятельности авиационных предприятий в современных условиях является наиболее полное удовлетворение общественных потребностей в авиационных услугах, которые постоянно совершенствуются, а структура их непрерывно усложняется. Значительная роль процесса программированной эксплуатации ВС отводится усилению заинтересованности авиационных предприятий и научных учреждений в использовании на практике результатов исследований и постоянном совершенствовании процессов интеграции по всем этапам ЖЦ.

Главная цель - повышение системной эффективности функционирования включает следующие основные аспекты деятельности:

- производственную - по обеспечению заданного уровня качества и надежности ВС и их систем согласно требованиям летно-технических, эксплуатационно-технических характеристик;
- научно-техническую, направленную на повышение уровня эксплуатационных свойств, процессов и систем программированной эксплуатации ВС на этапах ЖЦ;
- социальную;
- экономическую, направленную на рациональную реализацию на этапе эксплуатации совокупности заложенных в ВС свойств при минимальных затратах ресурсов;
- управленческую, обеспечивающую эффективное использование информационного ресурса систем комплексной автоматизации.

Системная эффективность функционирования ВС (Π_c) зависит от свойств объектов, процессов и систем (S_k); функций (F_k); задач (Z_k), отображающих свойства, и системы (Σ), реализующей намеченные функции и задачи.

$$\begin{aligned}
 \Pi_c &\rightarrow \Pi_k \{ \Pi_k, \Pi_k \in \Pi_k, k = 1, 2, \dots, K \} \\
 \Pi_k &\rightarrow S_k \{ s_k, s_k \in S_k, k = 1, 2, \dots, K \} \\
 F_k &\rightarrow Z_k \{ z_k, z_k \in Z_k, k = 1, 2, \dots, K \} \\
 Z_k &\rightarrow \Sigma_k^* \{ \Sigma_k^{**} : \Sigma_k^{**} \in \Sigma_k^* ; k = 1, 2, \dots, K \} \\
 \Sigma_k^* &\rightarrow P_k \{ p_k : p_k \in P_k, \dots, k = 1, 2, \dots, K \} \\
 \Sigma &= \bigcup_{k \in K} \Sigma_k^*
 \end{aligned} \tag{3}$$

где Π_k – множество целей, реализация которых по этапам ЖЦ обеспечивает достижение системной эффективности; S_k – множество свойств ОНТ, процессов и систем, реализуемых на этапах ЖЦ; F_k, Z_k – соответственно множество функций и задач, обеспечивающих достижение намеченных целей по этапам ЖЦ; Σ_k^* – подсистемы, реализующие множество функций и задач F_k, z_k, p_k – множество характеристик подсистем.

Можно записать:

$$P_k = P_k \left(E_k, \omega_k, z_k, f_k, \Pi_k, J_k, \Pi_c^{(\Sigma)}, J_c^{(\Sigma)} \right), \quad (4)$$

где E_k – множество элементов; ω_k – семейство структур, реализуемых в Σ_k^* ; z_k – семейство пространств сигналов, проходящих по связям подсистем; f_k – семейство операторов элементов подсистем; J_k – семейство целевых функций; $\Pi_c^{(\Sigma)}$ – пространство глобальных целей; $J_c^{(\Sigma)}$ – глобальная целевая функция.

Множество функций F_k покрывается совокупностью соответствующих задач Z_k . Каждая из множества задач формально может быть представлена в следующем виде

$$z_k = \sigma(z_k, R_k)$$

где $\sigma(z_k)$ – множество исходных данных задач; R_k – множество результатов решения задачи z_k .

Структура на множестве задач определяется с помощью отображения

$$\Theta: Z_k \rightarrow R_k(z_k), \quad (5)$$

определяющего для задачи $Z \in z_k$ множество $\Theta(z_k) \in Z_k$ задач Z_k результаты, решения которых входят в исходные данные задачи, т. е. $R_{z_k} \in \Theta(z_k)$. На множестве задач задаются функции M, T, B, K , которые определяют M – модель решения; T – метод решения; B – ограничения, используемые при решении задачи; K – оценку результатов.

Список литературы

1. ДСТУ 3589–97. Системи та комплекси авіаційного обладнання. Надійність та експлуатація. Терміни та визначення. – Київ, Держстандарт України, 1998. – 28 с.
2. Единые нормы летной годности гражданских транспортных самолетов стран-членов СЭВ (ЕНЛГ-С). – М.: Межведомственная комиссия по нормам летной годности гражданских самолетов и вертолетов СССР, 1985. – 470 с.
3. ARINC 651. Руководство по проектированию интегральной модульной авиационной электроники, Мериланд /Пер. с англ. 1991. – 278 с.

Стаття надійшла до редакції 17 березня 1998 року.

Владислав Михайлович Воробйов (1937) закінчив Московський авіаційний інститут в 1960 році. Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електрифікованих систем і комплексів повітряних суден Київського міжнародного університету цивільної авіації, академік Транспортної Академії України. Має понад 300 наукових публікацій в галузі аналізу та синтезу складних систем, системної ефективності та надійності авіоніки.



Vladislav M. Vorobiev (b. 1937) graduated from Moscow Aviation Institute (1960). DSc (Eng) professor, Head of the Aircraft Electrical Systems and Complex Department of the Kyiv International University of Civil Aviation, Academician of the Transport Academy of Ukraine. Author of more than 300 publications in the field of analysis and synthesis of complex systems, effectiveness and reliability of Aircraft Avionics.