

УДК. 629.78.017.1

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ РЕСУРСОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

© 2013 И. С. Щербина

ФГБОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,  
г. Санкт-Петербург

Проведен анализ возможностей имитационного моделирования при исследовании функционирования сложных организационно-технических систем. С помощью предложенных имитационных моделей системы эксплуатации технологического оборудования стартового комплекса ракет-носителей среднего класса проведена оценка ресурсоёмкости эксплуатационных мероприятий с учётом использования различных способов управления техническим состоянием технологического оборудования и влияния процессов деградации на показатели надежности оборудования. Для стартовых систем получены зависимости коэффициента готовности и затрат на обслуживание оборудования от времени эксплуатации, позволяющие оценить преимущества и недостатки используемых стратегий управления с учётом длительных сроков эксплуатации оборудования стартового комплекса.

*Техническое обслуживание, имитационная модель, стратегия управления техническим состоянием, эксплуатационные затраты.*

Для таких сложных систем как система эксплуатации (СЭ) технологического оборудования ракетно-космических комплексов (ТлОб РКК) установление связей или, другими словами, зависимостей показателей от характеристик является исключительно сложной задачей, так как ТлОб представляет собой совокупность уникальных агрегатов и систем, натурные испытания которых проводятся в ограниченном объёме или не проводятся совсем. Эти особенности обуславливают выбор в качестве инструмента исследования процесса эксплуатации ТлОб методов имитационного математического моделирования [1,2].

Основной задачей, решаемой СЭ стартового комплекса (СК), является поддержание ТлОб СК в работоспособном состоянии за счёт проведения технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). В процессе выполнения ТО и Р в СЭ расходуются предоставленные в её распоряжение ресурсы (материальные, технические, трудовые и т.д.). Возможно несколько подходов (стратегий) обслуживания, различающихся способами планирования ме-

роприятий, объёмами затрачиваемых ресурсов и уровнем обеспечиваемой надёжности оборудования [3].

Предлагается следующая структура затрат, обеспечивающих поддержание требуемого уровня готовности ТлОб СК и направленных на управление техническим состоянием ТлОб СК:

1) затраты  $C_{внедр}$  на разработку и внедрение соответствующей стратегии управления техническим состоянием, к которым относятся затраты на разработку (закупку) необходимых средств измерения, затраты на разработку необходимого методического и программно-математического обеспечения, затраты на средства передачи, обработки и хранения данных о техническом состоянии и затраты на обучение эксплуатирующего персонала;

2) затраты  $C_{контр}$  на выполнение эксплуатационных мероприятий в рамках выбранной стратегии управления техническим состоянием, в зависимости от выбранной стратегии включающие затраты на проведение периодических проверок

или на выполнение операций контроля технического состояния (мониторинга);

3) затраты  $C_{\text{восст}}$  на выполнение ремонтно-профилактических или ремонтно-восстановительных работ.

Выражение для эксплуатационных затрат можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_{\text{упр}} &= C_{\text{внедр}} + C_{\text{контр}} + C_{\text{восст}}; \\ C_{\text{внедр}} &= C_{\text{си}} + C_{\text{пмо}} + C_{\text{схд}} + C_{\text{эп}}; \\ C_{\text{контр}} &= C_{\text{пп}} + C_{\text{монит}}; \\ C_{\text{восст}} &= C_{\text{рпр}} + C_{\text{рвр}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Затраты на управление техническим состоянием ТлОб существенно влияют на результаты функционирования СК, так как направлены на восстановление (поддержание) технического ресурса систем СК, что является необходимым условием успешного функционирования комплекса.

Очевидно, что чем больше объём затрат на внедрение и выполнение контрольных мероприятий, тем лучшими будут результаты функционирования комплекса. Использование «гибких» стратегий управления, позволяющих оценивать фактическое значение параметров, характеризующих техническое состояние, вносит значительный вклад в стоимость жизненного цикла изделия за счёт дополнительных затрат на этапе разработки, производства образца и внедрения стратегии в эксплуатацию. Аналогичные показатели для «жестких» стратегий, которые не требуют использования дополнительных средств контроля и методик проведения контрольных мероприятий, существенно меньше.

Однако, несмотря на то что проведение контрольных мероприятий в рамках ресурсоемкой «гибкой» стратегии потребует дополнительных расходов, управление по состоянию позволит избежать критических отказов ТлОб и связанных с ними затрат на ремонт. В связи с этим в условиях достаточного финансирования кажется естественным переход к использованию «гибких» стратегий управления для всей номенклатуры ТлОб. Но опыт эксплуатации сложных технических ком-

плексов показал, что в вопросе выбора способа управления ограничения связаны не только с имеющимися в распоряжении ресурсами. Существует принципиальная невозможность получения достоверных оценок параметров ряда систем ТлОб, которая резко ограничивает группу систем, для которых возможно прогнозирование технического состояния.

Возникающая проблема выбора стратегии управления техническим состоянием связана не только с необходимостью обеспечения требуемых показателей качества функционирования СЭ. Эффективность используемой стратегии управления техническим состоянием ТлОб предлагается рассматривать, как минимум, с двух позиций: обеспечиваемый при выбранном управлении коэффициент готовности  $K_T$  ТлОб и затраченные на реализацию этих управляющих воздействий средства.

Затраты на реализацию стратегий управления техническим состоянием  $C_{\text{упр}}$  в значительной степени зависят не только от реализуемой стратегии управления, но и от времени, в течение которого эта стратегия (совокупность стратегий) используется.

Как уже было отмечено, «гибкая» стратегия характеризуется значительной, по сравнению с «жесткой», стоимостью внедрения, но меньшими расходами на выполнение эксплуатационных мероприятий вследствие снижения затрат на проведение ремонтов после отказов оборудования. Это обусловлено возможностями подсистемы мониторинга, реализуемой в рамках «гибкой» стратегии управления и позволяющей предотвращать отказы за счёт прогнозирования возможных моментов их появления и своевременного проведения ремонтно-профилактических работ. Можно предположить, что преимущество «гибкой» стратегии по обеспечению как требуемого уровня надёжности, так и экономичности, будет тем ощутимей, чем больше срок эксплуатации ТлОб и больше соотношение «стоимость проведения ремонта/стоимость проведения

профилактических работ». Для подтверждения этих предположений необходимо описать характер изменения  $K_r$  ТлОб и затрат на выполнение стратегий управления техническим состоянием с учётом возможных ошибок, возникающих в процессе эксплуатации; получить численные оценки, позволяющие прогнозировать динамику изменения надёжности и стоимости мероприятий управления техническим состоянием; провести корректировку выбранной стратегии управления.

Для проверки этих предположений с использованием методологии, предлагаемой в [3], в программной среде *GPSS World Student* была разработана программа, реализующая имитационную модель СЭ ТлОб СК, позволяющая описать характер изменения  $K_r$  ТлОб и затрат на выполнение стратегий управления техническим состоянием с учётом возможных ошибок, возникающих в процессе эксплуатации, получить численные оценки, позволяющие прогнозировать динамику изменения надёжности и стоимости мероприятий управления техническим состоянием, провести корректировку выбранной стратегии управления.

Для проведения эксперимента с разработанной имитационной моделью была использована ЭВМ, построенная на базе процессора *Intel Core i3* с тактовой частотой 2,13 ГГц, операционной системой *Microsoft Windows 7 Professional* и обладающая производительностью порядка 19,2 Гфлопс.

Для разработки модели СЭ ТлОб СК были использованы следующие исходные данные:

- сведения о структуре ТлОб СК (множестве видов, систем, элементов систем ТлОб СК и связях между ними);

- номенклатура и технологии реализации стратегий управления техническим состоянием ТлОб СК (сведения о периодичности и времени выполнения операций контроля технического состояния, периодичности и времени выполнения технических обслуживаний, ремонтно-

восстановительных и ремонтно-профилактических работ);

- значения показателей безотказности и ремонтнопригодности ТлОб СК;

- сведения о достоверности контроля технического состояния элементов систем ТлОб СК;

- характеристики затрат на реализацию стратегий управления техническим состоянием элементов систем ТлОб СК, включающие стоимость средств измерения, стоимость разработки и установки стационарных средств контроля технического состояния, затраты на мероприятия контроля технического состояния, ремонтно-профилактические и ремонтно-восстановительные мероприятия.

Требуемая информация была получена в процессе анализа эксплуатационных документов на оборудование СК РН среднего класса космодрома Плесецк, отчетов по результатам проведённых запусков, содержащих сведения о количестве, видах отказов и времени выполнения ремонтных мероприятий, и учитывает результаты экспертного опроса инженеров испытательных центров.

Проверка правильности функционирования модели была проведена:

- качественно, с помощью анализа графиков, отражающих ход процесса имитации функционирования СЭ ТлОб СК;

- количественно, с помощью сопоставления результатов, полученных при имитационном и аналитическом моделировании функционирования СЭ ТлОб СК.

В качестве исходных данных были использованы эксплуатационные характеристики элементов систем ТлОб, полученные по результатам мониторинга технического состояния в процессе их эксплуатации: суммарная интенсивность внезапных и постепенных отказов  $\lambda=7,569 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , интенсивность отказов при периодических проверках  $\lambda_{\text{пп}}=7,57 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ , периодичность контроля технического состояния элемента системы ТлОб  $\tau_k=2160 \text{ ч}$ , время контроля  $T_k=8 \text{ ч}$ ,

среднее время выполнения ремонтно-восстановительных работ  $T_{РВР} = 24$  ч.

Временная диаграмма функционирования имитационной модели системы ТлОб, техническим состоянием которой управляют по «гибкой» стратегии, приведена на рис. 1. Кривые, изображённые на

диаграмме, соответствуют состояниям системы ТлОб.

Результаты моделирования для времени моделирования  $T_{МОД} = 8800$  ч и ошибок  $\alpha_K = \beta_{РВР} = \beta_{РПР} = 0$  приведены в табл.1.

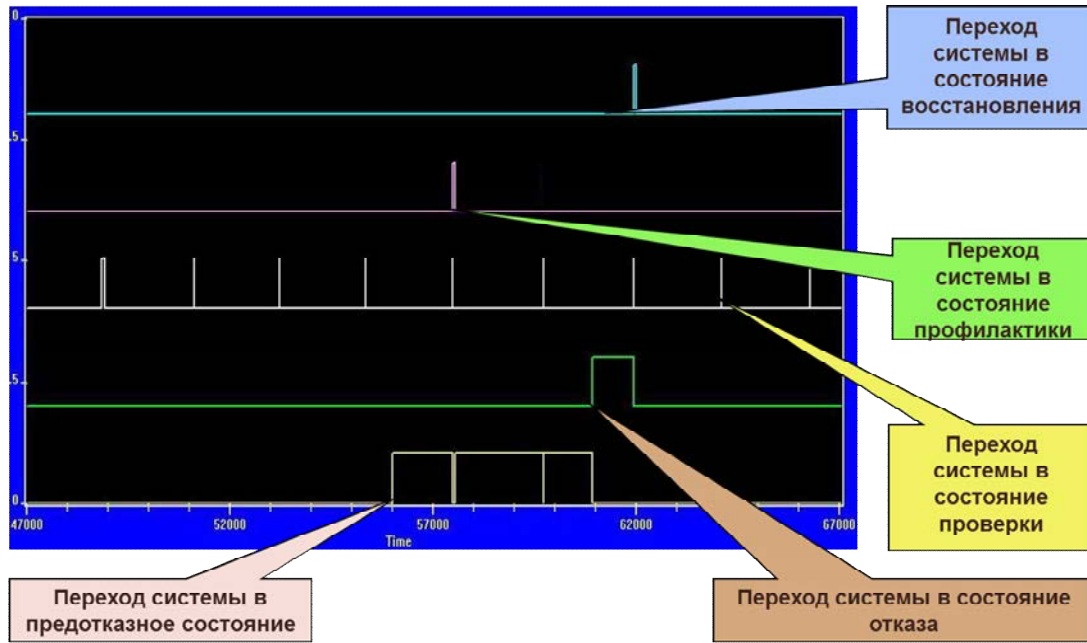


Рис.1. Временная диаграмма функционирования имитационной модели системы ТлОб при использовании «гибкой» стратегии управления её техническим состоянием

Таблица 1. Результаты моделирования СЭ, использующей при управлении техническим состоянием ТлОб «гибкую» стратегию

Наименование параметра	Значение
$t_{\text{средн}}$ пребывания системы ТлОб в предотказном состоянии	12,85 ч
$t_{\text{средн}}$ пребывания системы ТлОб в состоянии скрытого отказа	1,36 ч
$t_{\text{средн}}$ РПР на системе ТлОб	0,095 ч
$t_{\text{средн}}$ РВР на системе ТлОб	0,17 ч
$t_{\text{средн}}$ пребывания системы ТлОб в работоспособном состоянии	8797,9 ч
$K_T$ э системы ТлОб	0,99976

Для оценивания ресурсоёмкости стратегий управления техническим состоянием ТлОб СК от времени эксплуатации в качестве исходных данных используем среднюю стоимость одного часа выполнения работ, выраженную в условных единицах. В процессе моделирования стоимость внедрения «гибкой» стратегии

$S_{\text{внедр}}$ , представляющая собой совокупный объём затрат на разработку (если необходимо), внедрение и обслуживание средств контроля технического состояния, принималась равной 20, 30, 40 и 50 объёмов ежегодных затрат на эксплуатационные мероприятия  $S_{\text{упр}}$ , выполняемые при реализации этой стратегии; затраты на ре-

монтажно-восстановительные работы  $C_{РВР}$  варьировались в диапазоне от 1 до 30 объемов затрат на ремонтно-профилактические работы  $C_{РПР}$ . Зависимости эксплуатационных затрат от срока эксплуатации оборудования СК для «жесткой» и «гибких» стратегий приведены на рис. 2.

Затраты на периодические проверки при «жесткой» стратегии составили 4 усл. ед., на мероприятия мониторинга при «гибкой» стратегии – 7 усл. ед., на ремонтно-профилактические работы – 20 усл. ед. и на ремонтно-восстановительные

работы – от 20 до 400 усл. ед. В результате моделирования были получены зависимости затрат на управление техническим состоянием стартового оборудования СК от срока эксплуатации при условии  $C_{РВР} = 10C_{РПР}$  и  $\alpha_K = \beta_{РВР} = \beta_{РПР} = 0$ , свидетельствующие о том, что при сроках эксплуатации более 10 лет затраты на реализацию «жесткой» стратегии растут быстрее, чем затраты на управление техническим состоянием с использованием «гибкой» стратегии. Этот рост тем значительнее, чем больше соотношение  $C_{РВР}/C_{РПР}$ .

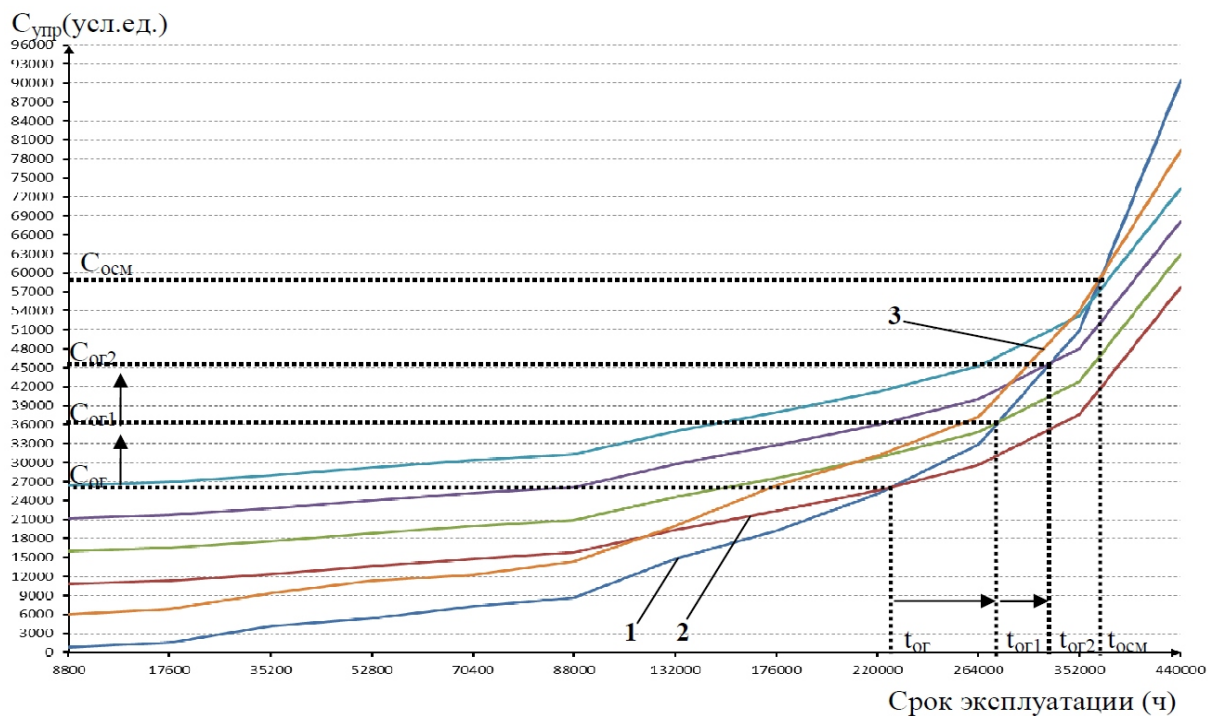


Рис.2. Зависимости эксплуатационных затрат от срока эксплуатации оборудования СК

Момент времени, в который суммарные затраты на реализацию мероприятий управления техническим состоянием с использованием «жесткой» стратегии становятся равными аналогичным затратам на реализацию «гибкой» стратегии, назовем временем окупаемости «гибкой» стратегии –  $t_{ог}$ .

При соотношении  $C_{РВР} = 10C_{РПР}$  стоимость эксплуатации ТлОб по «жесткой» стратегии становится эквивалентна затратам на «гибкую» стратегию ( $C_{ог} = 26300$

усл. ед.) через 226360 часов (точка  $t_{ог}$  на оси абсцисс),  $K_{Г}$  для «гибкой» стратегии при этом составит 0,99901, а для «жесткой» стратегии – 0,98695. В дальнейшем затраты на реализацию «жесткой» стратегии растут быстрее, чем затраты на реализацию «гибкой» стратегии, и к 50 годам (440000 часов) составят 90417 усл. ед. и 57702 усл. ед. соответственно.

Разработанные имитационные модели СЭ ТлОб СК позволяют оценить не только зависимость затрат на управление

техническим состоянием ТлОб от используемой стратегии управления, но и влияние на готовность ТлОб процессов, приводящих к снижению значений показателей надёжности ТлОб. Результаты исследования влияния на  $K_T$  ТлОб СК процессов старения и деградации, ошибок первого и второго рода, характеризующих качество выполняемых эксплуатационных мероприятий, целесообразно учитывать при прогнозировании изменения технического состояния ТлОб и формировании стратегии управления с учётом предполагаемого срока его эксплуатации.

### Библиографический список

1. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретных систем [Текст]: учеб. пособие / Т.И. Алиев. – СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
2. Бражник, А.Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS World [Текст] / А.Н. Бражник. – СПб.: РенOME, 2006. – 439 с.
3. Кузнецов, А.Н. Методологические основы анализа функционирования и развития системы эксплуатации космических средств [Текст] / А.Н. Кузнецов. – СПб.: Наука, 2002. – 167 с.

## SIMULATION MODELING AS A METHOD OF ASSESSING THE RESOURCE INTENSITY OF SPACE ROCKET COMPLEX SUPPORT EQUIPMENT OPERATION

© 2013 I. S. Shcherbina

Military Space Academy named after Mozhaisky

Simulation by software models is one of the most frequently used techniques for the analysis of complex engineering and organizational systems. The paper presents the analysis of capabilities of analytical and simulation models when analyzing the functioning of complex engineering and organizational systems. The resource intensity of operation is assessed with the help of the proposed simulation models of the system of operating the support equipment of medium capacity boosters' launch facilities taking into account the application of various methods of controlling the technical condition of the equipment and the influence of degradation processes on the equipment reliability. The dependences of the availability factor and maintenance costs on the time in service have been obtained for the launch systems that make it possible to assess the advantages and disadvantages of the control strategies taking into account long periods of launch facilities operation.

*Maintenance, simulation model, strategy of controlling technical condition, maintenance costs.*

### Информация об авторе

**Щербина Игорь Сергеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Организация эксплуатации и технического обеспечения вооружения, военной и специальной техники», Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург. E-mail: [ispytatel1977@mail.ru](mailto:ispytatel1977@mail.ru). Область научных интересов: моделирование процессов поддержания в готовности систем вооружения, управление в организационно-технических системах.

**Shcherbina Igor Sergeevich**, candidate of engineering, associate professor of the department "Organization of weapons and special system operation process", Military Space Academy named after Mozhaisky. E-mail: [ispytatel1977@mail.ru](mailto:ispytatel1977@mail.ru). Area of research: operational process modeling, system reliability and availability assessment.