

Научная статья

УДК 623.74

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176862>

МОДЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА КОМПЛЕКСЕ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Евгений Вячеславович Фетисов¹, Дмитрий Вячеславович Зимников²

^{1,2}ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Воронеж, Россия

¹mr_907@mail.ru

²zx0282@gmail.com

Аннотация. В статье представлен подход к разработке модели выполнения периодического технического обслуживания на комплексах с беспилотными летательными аппаратами. Активное применение комплексов сопровождается исследованиями, направленными на совершенствование способов применения, повышение тактико-технических характеристик, при этом вопросам выполнения различных видов технического обслуживания, их моделированию и оценке, несмотря на имеющиеся противоречия в теории и практики не уделяется достаточного внимания. При организации периодических видов технического обслуживания необходимо учитывать большое количество факторов, которые могут повлиять на сроки выполнения и качество работ. В статье приведен краткий анализ

существующих имитационных моделей сложных систем, в различных средах. В системе Arena разработана имитационная модель процесса организации и выполнения периодического технического обслуживания на комплексе с беспилотными летательными аппаратами, позволяющая принять рациональное решение о выборе исполнителей обслуживания, оценить объём загруженности специалистов, а также сформировать требования по рациональному составу необходимых средств технического обслуживания.

Ключевые слова: модель, комплекс с беспилотными летательными аппаратами, эксплуатация, периодическое техническое обслуживание

Для цитирования: Фетисов Е.В., Зимников Д.В. Модель выполнения периодического технического обслуживания на комплексе с беспилотными летательными аппаратами // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176862>

MODEL OF PERFORMING PERIODIC MAINTENANCE AT THE COMPLEX WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES

Evgeniy V. Fetisov¹, Dmitriy V. Zimnikov²

^{1,2}MESC Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia

¹mr_907@mail.ru

²zx0282@gmail.com

Abstract. This article presents an approach to developing a model for performing periodic maintenance on unmanned aerial vehicle complexes. The active use of the complexes is accompanied by research aimed at improving the methods of use, increasing the tactical and technical characteristics, but not given issues of performing various type of maintenance, their modeling and evaluation, despite the existing contradictions in theory and practice. When organizing of periodic types of maintenance it is necessary to take into account a large number factors that can affect the timing and quality of work. Simulation modeling is one of the most effective tools for studying complex systems today. Imitation is a kind of means of reproducing phenomena, just as a model is an abstract description of a system, object, phenomenon or process. That is, modeling is such an abstract form of reflection of reality, in which certain properties of the proposed objects are represented in the form of an image, a diagram, a plan, or a complex of equations, algorithms and programs. The use of simulation modeling in many fields of activity has a number of undeniable advantages. Firstly, it is an experimental method of cognition, which is a simple and visual tool for analysis. It helps to find optimal solutions to problems and gives a clear idea of complex systems. The simulation model of the process of organization and performance of periodic maintenance of a complex with unmanned aerial vehicles is developed in Arena system, allowing to make rational decision on the selection of maintenance performers, to assess the workload of specialists, as well as to form requirements for a rational composition of the necessary maintenance tools.

Keywords: model, unmanned aerial vehicle complex, operation, periodic maintenance

For citation: Fetisov E.V., Zimnikov D.V. Model of performing periodic maintenance at the complex with unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*, 2023, no.132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176862>

Введение

На различных стадиях жизненного цикла комплексов с беспилотными летательными аппаратами (КБПЛА) возникают и решаются задачи оптимизации их программ эксплуатации, нахождение рациональной модели системы эксплуатации. При разработке тактико-технических требований необходимо качественно разработать общий характер системы эксплуатации и найти наиболее оптимальные по какому-либо критерию значения наиболее общих показателей системы эксплуатации [1, 2]. На этапе проектирования более качественно разрабатывают структуру системы эксплуатации КБПЛА и на этой основе количественно описывают ее характеристики, такие как периодичность и виды технического обслуживания (ТО), средства и методы восстановления готовности к использованию. В этот же период разрабатывают технологию и организацию основных эксплуатационных процессов, при этом программу эксплуатации КБПЛА закрепляют в комплекте эксплуатационной документации.

На этапах производства и эксплуатации КБПЛА возникают задачи управления различными процессами, следовательно, для этапа ввода в эксплуатацию отдельных КБПЛА необходима рациональная программа оперативного управления. Главная цель – определить критерии, и с их учетом установить процессы оперативного

управления вводом КБПЛА в эксплуатацию, приведение его в готовность к применению, поддержание в этой готовности, а также применение по назначению. Важной характеристикой при вводе комплекса в эксплуатацию является надежность создаваемого объекта. Надежность сложной технической системы является одним из важных свойств, от правильной работы сложной технической системы зависит успешность выполнения системой предназначенных ей задач [3]. В соответствии с разработанным схемно-конструкторским решением рассчитываются показатели надежности, которые позволяют сделать вывод о возможности достичь требуемого уровня надежности в соответствии с техническим заданием на объект [4].

Опыт решения подобных задач показывает, что, несмотря на строгость и общность постановок задач, результаты решения получаются неудовлетворительными, так как к ряду параметров критериальные функции и функции ограничений оказываются нечувствительными, а значит эти параметры можно назначить произвольно. Следовательно, необходимо четко определить уровни параметров системы технической эксплуатации, подбирать чувствительные к ним критерии и ограничения, а общую постановку задачи нахождения всех параметров системы технической эксплуатации заменять серией иерархически связанных частных задач [5].

Постановка задачи исследования

При математической постановке задачи важен правильный выбор того или иного критерия. В работе [6] описаны методы решения многокритериальных задач, однако подавляющее число технических задач оптимизации реально решаются как

однокритериальные. Одну из функций ограничений принимают в качестве критериальной, что позволяет найти новое оптимальное решение по другому критерию. Наиболее общие показатели системы эксплуатации КБпЛА являются ее выходами, требуемые значения которых могут быть найдены только при анализе общей системы, описывающей создание и эксплуатацию системы КБпЛА. Наиболее высокая по иерархическому уровню, задача оптимизации программы технической эксплуатации КБпЛА – задача нахождения оптимальных по определенному критерию требуемых значений выходных параметров.

Математическое описание системы ТО как некоторого обобщенного элемента удобнее всего вести на основе теории полумарковских процессов, которая позволяет при совсем небольшом числе состояний получить конечные аналитические выражения для искомой целевой функции и функции ограничений через параметры системы ТО. Система ТО и ремонта авиационной техники представляет собой совокупность взаимосвязанных средств, документации ТО и ремонта и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления (качества либо эксплуатационных характеристик) объектов, входящих в эту систему [7]. При рассмотрении положений теории полумарковских процессов использованы труды [8, 9], которые ясно отражают раскрытие физической сущности математических моделей.

Полное и всестороннее исследование сложной системы на стадии ее эксплуатации невозможно без моделирования протекающих в ней процессов. Моделирование является средством, позволяющим решать проблемы построения и

нахождение рациональной системы организационного управления. Учет условий приводит к наличию серьезных объемов различной информации в различных областях знаний, обуславливая понимание сложной технической системы как многопараметрического объекта, описываемого конечным множеством математических моделей, каждая из которых отражает конкретную группу свойств исходной системы. Единственной технологией, обладающей возможностью структурной реконфигурации технологического процесса, остается технология имитационного моделирования, применяемая ко всему спектру задач синтеза оптимальной структуры сложных технических систем [10, 11].

При исследовании процессов ТО техники особое место занимает полумарковский процесс с дискретными состояниями системы и непрерывным временем переходов системы из состояния в состояние. Существует несколько способов задания полумарковских процессов, рассмотрим тот, который удобнее использовать при решении практических задач. Полумарковский процесс определен, если заданы: 1) граф состояний, а также возможные переходы; 2) матрица независимых функций распределения времени пребывания элемента; 3) начальное состояние в момент $t = 0$. Векторное пространство S_j является фазовым пространством рассматриваемого КБПЛА, изменение состояния которого показано на рисунке 1.

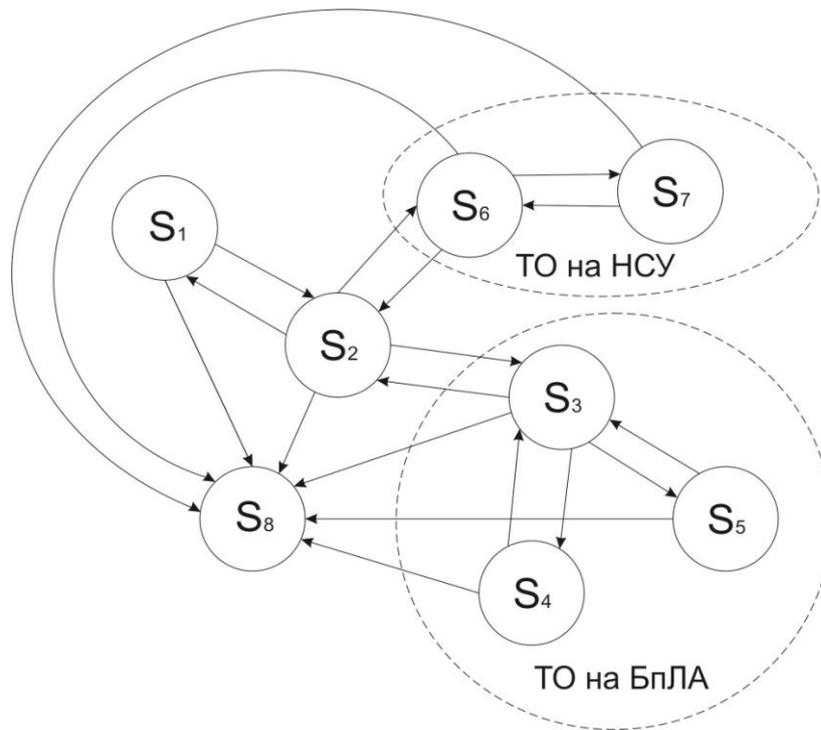


Рисунок 1 – Граф состояний КБПЛА в процессе эксплуатации

Система может находиться в одном из состояний $\{S_1, S_2, \dots, S_n; n=8\}$, где n – конечное число. В некоторые моменты времени система может случайным образом переходить из одного состояния S_i в другое состояние S_j с некоторой интенсивностью λ_{ij} , которая в общем случае зависит от времени. Случайным процессом называется процессом с дискретным временем, если переходы системы из состояния в состояние возможны только в строго определенные, заранее фиксированные моменты времени [12]. В работе были рассмотрены следующие состояния КБПЛА и переходные процессы между ними в процессе его эксплуатации:

- S_1 – выполнение КБПЛА полетного задания;

- S_2 – состояние подготовки КБПЛА к выполнению полетного задания;
- S_3 – выполнение оперативного ТО на БПЛА;
- S_4 – выполнение периодического ТО на БПЛА;
- S_5 – выполнение работ по ТО при кратковременном хранении на БПЛА;
- S_6 – выполнение оперативного ТО на наземной станции управления (НСУ);
- S_7 – выполнение периодического ТО на НСУ;
- S_8 – безвозвратные потери БПЛА или НСУ.

На основе состояний КБПЛА составлена система дифференциальных уравнений Колмогорова, которая имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1}{dt} = P_2(t)\lambda_{21} - P_1(t)\lambda_{12} - P_1(t)\lambda_{18}; \\ \frac{dP_2}{dt} = P_1(t)\lambda_{12} - P_2(t)\lambda_{21} - P_2(t)\lambda_{23} + P_3(t)\lambda_{32} - P_2(t)\lambda_{26} + P_6(t)\lambda_{62} - P_2(t)\lambda_{28}; \\ \frac{dP_3}{dt} = P_2(t)\lambda_{23} - P_3(t)\lambda_{32} - P_3(t)\lambda_{34} + P_4(t)\lambda_{43} - P_3(t)\lambda_{35} + P_5(t)\lambda_{53} - P_3(t)\lambda_{38}; \\ \frac{dP_4}{dt} = P_3(t)\lambda_{34} - P_4(t)\lambda_{43} - P_4(t)\lambda_{48}; \\ \frac{dP_5}{dt} = P_3(t)\lambda_{35} - P_5(t)\lambda_{53} - P_5(t)\lambda_{58}; \\ \frac{dP_6}{dt} = P_2(t)\lambda_{26} - P_6(t)\lambda_{62} + P_7(t)\lambda_{76} - P_6(t)\lambda_{67} - P_6(t)\lambda_{68}; \\ \frac{dP_7}{dt} = P_6(t)\lambda_{67} - P_7(t)\lambda_{76} - P_7(t)\lambda_{78}; \\ \frac{dP_8}{dt} = P_1(t)\lambda_{18} + P_2(t)\lambda_{28} + P_3(t)\lambda_{38} + P_4(t)\lambda_{48} + P_5(t)\lambda_{58} + P_6(t)\lambda_{68} + P_7(t)\lambda_{78}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где P_i – апостериорные вероятности состояния; t – время перехода; λ_{ij} – соответствующие интенсивности переходов.

Вероятностная математическая модель применения КБпЛА представляет собой обобщенную вероятностную модель процесса в пространстве состояний, отображает основные этапы применения КБпЛА и определяет аналитическую связь вероятностей состояний и переходных вероятностей. Последние по существу представляют собой вероятности решения задач того или иного этапа применения КБпЛА.

Сформировав граф состояний, приступим к постановке задачи нахождения рационального вектора \bar{Z} варьируемых параметров, описывающих силы и средства эксплуатирующих организаций, для которого известен граф, включающий $i = 1, 2, \dots, n$, где n – конечное число состояний.

В такой задаче в качестве ограничений могут быть использованы какие-либо известные функции $G(P_i)$ от вероятностей P_i пребывания системы в i -м состоянии. Например, если состояние $i=2$ – состояние подготовки исправного КБпЛА к выполнению полета то, по определению, вероятность того, что в случайный момент времени элемент находится в исправном состоянии, является коэффициентом технической готовности. При этом в качестве одного из возможных ограничений можно принять:

$$K_{mg}(\bar{Z}) = P_i(\bar{Z}) \geq K_{mg.mp}, \quad (2)$$

где $K_{mg.mp}$ – требуемое значение величины K_{mg} .

Таким образом, в общем виде функция ограничений имеет следующий вид:

$$G(\bar{Z}) = G[P_i(\bar{Z})]; \bar{Z} = \{z_v\}, \quad (3)$$

$$z_{vн} \leq z_v \leq z_{vв}, \quad (4)$$

где $z_{vн}$, $z_{vв}$ – нижний и верхний пределы изменения параметра z_v .

Получение результатов моделирования, их анализ и выработка какого-либо решения о совершенствовании системы ТО техники, необходимо выполнять в соответствии с указанными выше условиями и ограничениями.

Разработка модели выполнения периодического ТО

Анализ эффективности технической эксплуатации КБПЛА показал, что необходима проработка определенных мероприятий, таких как:

- более детальная проработка номенклатуры и трудозатрат периодического технического обслуживания, учитывающая особенности каждого типа;
- углубленное обучение персонала методам и способам ТО и ремонта элементов и блоков БПЛА;
- осуществление централизованной поставки необходимой элементной базы для осуществления ремонта блоков;
- максимальное замещение средств ТО и ремонта, а также комплектующих изделий иностранного производства на отечественные аналоги;
- повышение контроля качества комплектующих изделий, определение порядка сбора информации;
- обобщение и анализ сведений о качестве изделий БПЛА, полученных по результатам эксплуатации и ремонта для направления их на предприятия промышленности;

- осуществление закупки современных наземных автоматизированных средств контроля для более качественной диагностики систем;

- рациональное распределения фонда рабочего времени.

Вышеперечисленные мероприятия позволят более рационально использовать существующие КБпЛА и приведут к существенной экономии бюджетных средств, сократят время простоя на периодическом ТО, тем самым обеспечат потребное количество вылетов.

Целью работы является разработка модели выполнения периодического технического обслуживания на комплексе с беспилотными летательными аппаратами, в связи, с чем необходимо более подробно описать выполняемые технологические операции для конкретного вида работ.

Проведенный сравнительный анализ методологий, предлагаемых для анализа функций и формализации процессов, показал целесообразность применение методологии IDEF0. Методология IDEF0 используется для создания функциональных моделей, отображающие структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающие эти функции. С целью определения функций и процессов выполнения периодического технического обслуживания, необходимо выполнить дефрагментацию каждого этапа работ с использованием методологии функционального моделирования и графической нотации стандарта IDEF0, предназначенной для формализации и описания процессов выполнения работ различных предприятий. Декомпозиция типового

процесса выполнения периодического ТО на БпЛА по методологии IDEF0 представлена на рисунке 2.

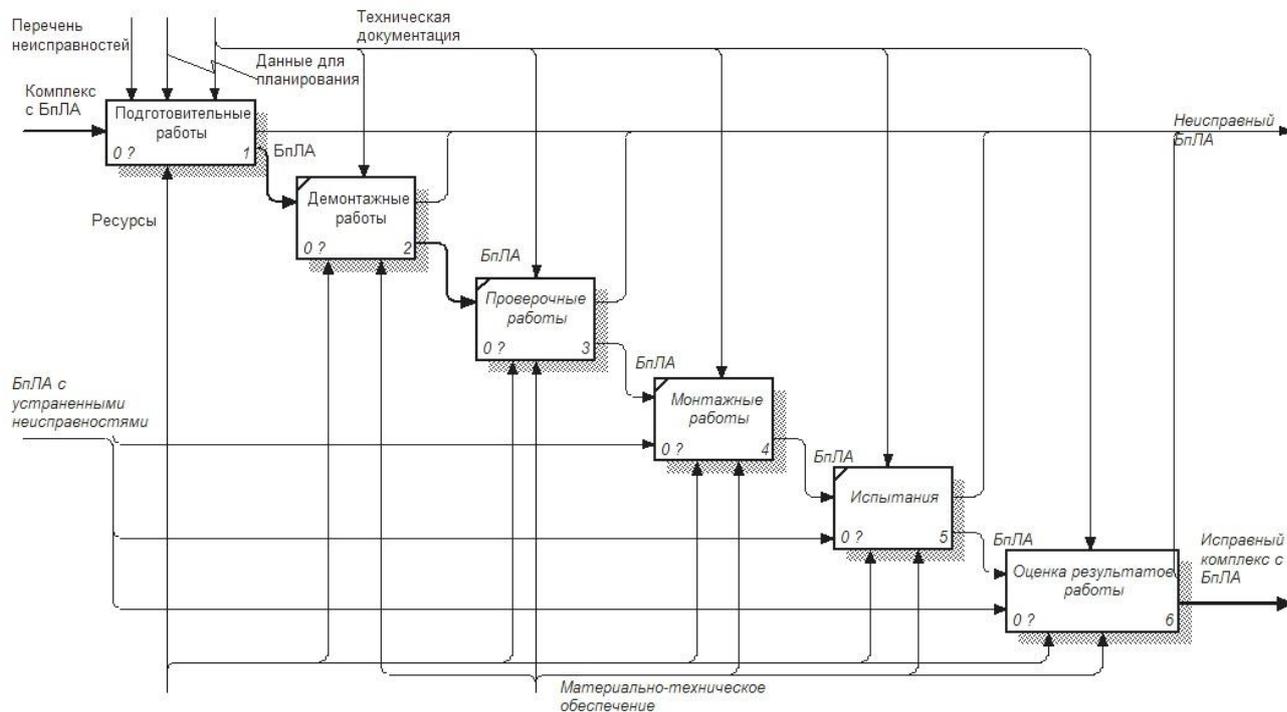


Рисунок 2 – Декомпозиция основного процесса выполнения периодического ТО на БпЛА

На НСУ, входящих в состав КБпЛА, периодическое ТО, контроль технического состояния, а также другие виды работ проводятся в сроки, предусмотренные регламентом ТО. В основном сроки выполнения вышеперечисленных работ не отличаются объемным перечнем, но при этом технологическое время операций варьируется в зависимости от настройки и правильного функционирования программного обеспечения.

Основной процесс работ на НСУ (рисунок 3) можно разделить на следующие операции:

- проверка работоспособности станции,
- периодическое ТО на НСУ,
- выполнение операций ТО по совмещению НСУ с БпЛА,
- проведение опробование систем.

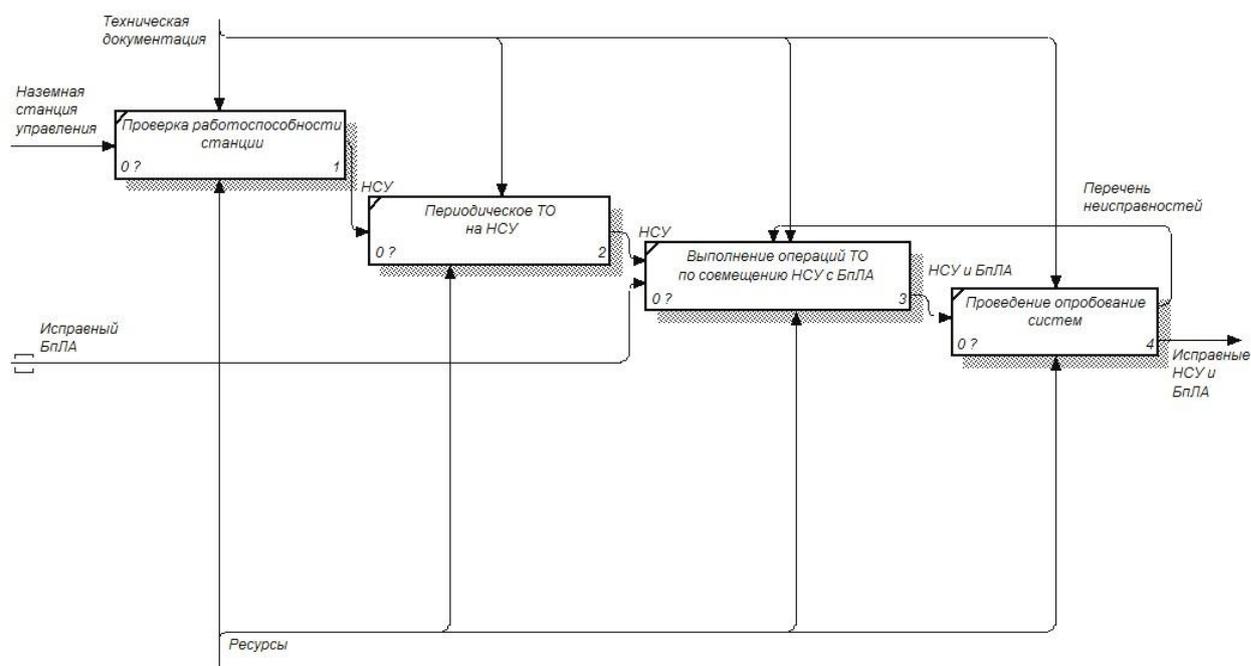


Рисунок 3 – Декомпозиция процесса выполнения периодического ТО на НСУ и работ по опробованию КБПЛА

Проведем формирование процедур выполнения периодического ТО на КБПЛА с применением имитационного моделирования. Имитационное моделирование – это метод исследования, заключающийся в имитации на ЭВМ (с помощью комплекса программ) процесса функционирования системы или отдельных ее частей и элементов. Сущность метода имитационного моделирования заключается в разработке таких алгоритмов и программ, которые имитируют поведение системы,

ее свойства и характеристики в необходимом для исследования системы составе, объеме и области изменения ее параметров [13].

При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причем имитируются явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы. Имитационное моделирование позволяет осуществлять многократные испытания модели с нужными входными данными, чтобы определить их влияние на выходные критерии оценки работы системы. При таком моделировании компьютер используется для численной оценки модели, а с помощью полученных данных рассчитываются ее реальные характеристики [14-17].

В настоящее время имитационное моделирование широко применяется в мире для исследования сложных систем, в том числе на основе решения прикладных задач теории массового обслуживания [18, 19]. Рассмотрим построение имитационной модели одной из процедур поддержания лётной годности, а именно выполнения периодического ТО на КБПЛА.

Одной из основных задач разработки функциональной модели выполнения периодического ТО на КБПЛА является оценка требуемых ресурсов для выполнения различных вариантов работ. Особую роль будут играть ресурсы, связанные с трудозатратами на выполнение технологических операций, трудозатраты на

выполнение ремонта отказавших агрегатов и изделий, а также ресурсы, связанные с транспортировкой комплекса, его агрегатов и оборудования.

Вышеперечисленные ресурсы будут учтены при имитационном моделировании периодического ТО на КБпЛА. В качестве среды имитационного моделирования была выбрана «Arena», преимуществом которой является совмещение и построение модели на основе функциональной модели, выполненной с помощью методологии IDEF0. Один из вариантов построения модели представлен на рисунке 4.

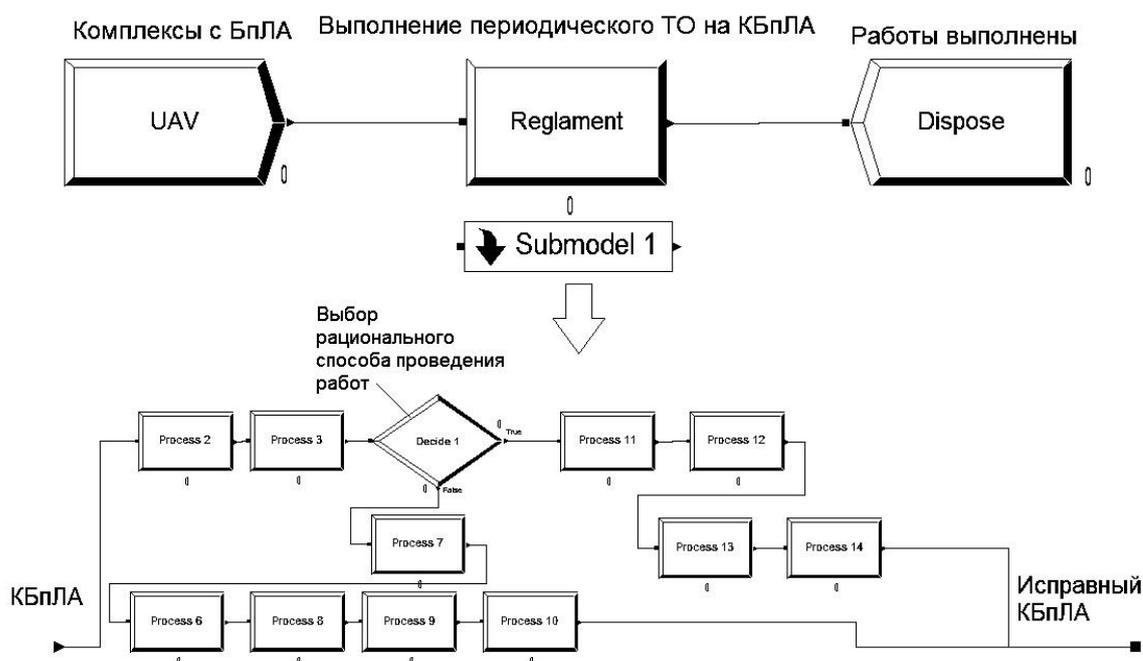


Рисунок 4 – Структура имитационной модели выполнения периодического ТО на КБпЛА

Блок «UAV» (рисунок 4) отвечает за генерацию рассматриваемых объектов и введение их в систему обслуживания. При помощи блока «Process» выполняется

задержка комплекса на определённый временной интервал, захват и освобождение ресурсов. Если процесс предусматривает захват ресурсов, то перед процессом возникает очередь. В очереди стоят объекты, ожидающие освобождение ресурсов. В блоке «Decide» происходит ветвление, для двух случаев, когда ветвь выбирается по некоторому условию и задана вероятность перехода в каждую из ветвей соответственно. В блоке «Dispose» происходит подсчёт количества объектов на выходе [20].

Результаты моделирования представлены в виде гистограммы средней занятости личного состава эксплуатирующей организации различных групп, представленной на рисунке 5. Также, в дальнейших исследованиях, имеется возможность проанализировать загруженность средств ТО, применяемых во время выполнения работ, а также интенсивность использования необходимых запасных частей и материалов.



Рисунок 5 – Гистограмма средней занятости личного состава

На основе полученных результатов, находим обобщенные значения для структуры системы ТО, что позволит оценить состояние загрузки в режиме реального времени и в последующем принимать управленческое решение о перераспределении и планировании работ. Данная информация является научно-обоснованным базисом для принятия решений по формированию нового облика системы ТО.

Представленная имитационная модель позволит обосновать технологический процесс, периодичность и трудозатраты периодических видов ТО, выполняемых на КБпЛА. По результатам имитационного моделирования учитывается рациональный вариант выполнения работ. В разработанной модели в отличие от существующих, учтено влияние расширенного количества входных показателей и возможные состояния технической эксплуатации КБпЛА. Предложенный аппарат может быть в дальнейшем использован при решении задач рационального распределения имеющихся в наличии ресурсов (сил и средств), а также повышении коэффициента технической готовности КБпЛА.

Список источников

1. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26767>

2. Каримов А.Х. Возможности беспилотных авиационных систем следующего поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26768>
3. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. - М.: Мир, 1972. - 544 с.
4. Копейка Е.А., Вербин А.В. Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)
5. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высшая школа, 1981. – 368 с.
6. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. – М.: Советское радио, 1975. - 192 с.
7. ГОСТ 18322 – 2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2011. – 16 с.
8. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. - Киев: Наукова думка, 1976. - 184 с.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 2006. – 571 с.
10. Максимей И.В., Смородин В.С, Демиденко О.М. Разработка имитационных моделей сложных технических систем. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 298 с.

11. ГОСТ Р 53863-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2010.
12. Самуленков Ю.И., Яблонский С.Н., Босых Н.Н. Основы технической эксплуатации авиационной техники: учебное пособие. - Воронеж: ООО «МИР», 2019. - 80 с.
13. Железняков А.О., Сидорчук В.П., Подрезов С.Н. Имитационная модель системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного оборудования // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165538>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-26](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-26)
14. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. – СПб.: Питер, 2004. – 846 с.
15. Чепко И.Н., Богомолов Д.В., Карпенко О.Н. Управление запасами агрегатов и запасных частей для авиационной техники государственной авиации: основные проблемы и пути решения // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100823>
16. Боев В.Д. Компьютерное моделирование. – СПб.: Военная Академия Связи, 2014. – 432 с.
17. Верещиков Д.В., Волошин В.А., Ивашков С.С., Васильев Д.В. Применение нечеткой логики для создания имитационной модели управляющих действий летчика // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91926>

18. Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1969. – 324 с.
19. Бадалов А.Ю., Разумов Д.А. Методика моделирования в жизненном цикле большой автоматизированной системы космодрома уровня Smart City // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=93491>
20. Алексаян А.Р., Киселёв Д.Ю., Файнбург И.А. Формирование процедур выполнения регламентных работ с применением информационных технологий имитационного моделирования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 173. С. 98-108.

References

1. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26767>
2. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26768>
3. Braison A., Kho Yu-Shi. *Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya* (Applied optimal control), Moscow, Mir, 1972, 544 p.
4. Kopeika E.A., Verbin A.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)
5. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiei letatel'nykh kompleksov* (Control of the operation of aircraft complexes), Moscow, Vysshaya shkola, 1981, 368 p.

6. Podinovskii V.V., Gavrilov V.M. *Optimizatsiya po posledovatel'no primenyaemym kriteriyam* (Optimization based on consistently applied criteria), Moscow, Sovetskoe radio, 1975, 192 p.
7. *GOST 18322 – 2016. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Terminy i opredeleniya* (State Standard 18322 – 2016. Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions), Moscow, Standartinform, 2011, 16 p.
8. Korolyuk V.S., Turbin A.F. *Polumarkovskie protsessy i ikh prilozheniya* (Semi-Markov processes and their applications), Kiev, Naukova dumka, 1976, 184 p.
9. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* (Probability theory), Moscow, Nauka, 2006, 571 p.
10. Maksimei I.V., Smorodin V.S, Demidenko O.M. *Razrabotka imitatsionnykh modelei slozhnykh tekhnicheskikh sistem.* (Development of simulation models complex technical systems), Gomel', GGU im. F. Skoriny, 2014, 298 p.
11. *GOST R 53863-2010. Vozdushnyi transport. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta aviatsionnoi tekhniki. Terminy i opredeleniya.* (State Standard R 53863-2010. Air transport. Maintenance and repair system of aviation equipment. Terms and definitions), Moscow, Standartinform, 2010.
12. Samulenkov Yu.I., Yablonskii S.N., Bosykh N.N. *Osnovy tekhnicheskoi ekspluatatsii aviatsionnoi tekhniki* (Fundamentals of technical operation of aviation equipment), Voronezh, OOO «MIR», 2019, 80 p.
13. Zheleznyakov A.O., Sidorchuk V.P., Podrezov S.N. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165538>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-26](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-26)

14. Lou A.M., Kel'ton V.D. *Imitatsionnoe modelirovanie*. (Simulation modeling), Saint Petersburg, Piter, 2004, 846 p.
15. Chepko I.N., Bogomolov D.V., Karpenko O.N. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100823>
16. Boev V.D. *Komp'yuternoe modelirovanie* (Computer modelling), Saint Petersburg, Voennaya Akademiya Svyazi, 2014, 432 p.
17. Vereshchikov D.V., Voloshin V.A., Ivashkov S.S., Vasil'ev D.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91926>
18. Ovcharov L.A. *Prikladnye zadachi teorii massovogo obsluzhivaniya* (Applied tasks of queuing theory), Moscow, Mashinostroenie, 1969, 324 p.
19. Badalov A.Yu., Razumov D.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=93491>
20. Aleksanyan A.R., Kiselev D.Yu., Fainburg I.A. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*, 2011, no. 173, pp. 98-108.

Статья поступила в редакцию 19.05.2023

Одобрена после рецензирования 01.09.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 19.05.2023; approved after reviewing on 01.09.2023; accepted for publication on 27.10.2023