

Метод оценки адекватности имитационной модели распределенной информационно-управляющей системы группой БПЛА

Евгений Н. Надеждин

*Российский государственный гуманитарный университет,
Москва, Россия, en-hope@yandex.ru*

Максим А. Тихонов

*Российский государственный гуманитарный университет,
Москва, Россия, Tikhonov.99@yandex.ru*

Кирилл А. Михеев

*Российский государственный гуманитарный университет,
Москва, Россия, mistermihh@yandex.ru*

Аннотация. Эффективность инновационных идей и технических решений, воплощаемых в перспективных системах управления беспилотными летательными аппаратами (дронами), в значительной степени определяется методами и средствами математического моделирования, привлекаемыми для статистического анализа и прогностической оценки показателей целевого применения. В статье рассмотрена проблема оценки адекватности математических моделей в задачах проектной эффективности распределенных информационно-управляющих систем группой дронов. На основе анализа накопленного опыта проектирования сформулированы общие требования к методике оценки адекватности моделей. Раскрыта сущность понятия «адекватность», и дана общая характеристика применяемых на практике методов анализа показателей адекватности. Представлена авторская интерпретация проблемы комплексной оценки адекватности имитационной модели, ориентированной на решение совокупности информационно-зависимых задач симуляции и статистического анализа характеристик. В качестве базовой математической схемы для операционного моделирования информационно-управляющей системы группой дронов предложена расширенная временная сеть Петри, позволяющая получить набор системных характеристик объекта исследования в терминах сетей массового обслуживания.

Обоснован методический подход к задаче комплексной оценки адекватности имитационной модели распределенной информационно-

управляющей системы, который заключается в декомпозиции предметной области, в выделении множества информационно-зависимых задач исследования, в формировании векторного критерия адекватности и в последующем поиске Парето-оптимальной области множества управляемых параметров имитационной модели. Предложенный подход может быть полезен при выборе и настройке имитационной модели на задачи проектной эффективности элементов информационно-управляющей системы группой дронов на начальных этапах ее проектирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, групповое управление, распределенная информационно-управляющая система, имитационная модель, комплексная оценка адекватности, векторный критерий адекватности

Для цитирования: Надеждин Е.Н., Тихонов М.А., Михеев К.А. Метод оценки адекватности имитационной модели распределенной информационно-управляющей системы группой БПЛА // Вестник РГТУ. Информатика. Информационная безопасность. Математика. 2024. № 4. С. 40–57. DOI: 10.28995/2686-679X-2024-4-40-57

Method for assessing the adequacy of the simulation model of a distributed information and control system for a group of UAVs

Evgenii N. Nadezhdin

*Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia,
en-hope@yandex.ru*

Maksim A. Tikhonov

*Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia,
Tikhonov.99@yandex.ru*

Kirill A. Mikhееv

*Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia,
mistermihh@yandex.ru*

Abstract. The effectiveness of innovative ideas and technical solutions implemented in advanced control systems for unmanned aerial vehicles (drones) is largely determined by the methods and tools of mathematical modeling used for statistical analysis and prognostic assessment of target application indicators. The article considers the issue of assessing the adequacy of mathematical models in tasks of the design efficiency of distributed information and control systems for a group of drones. Based on the analysis of accumulated design experience, ge-

neral requirements for the methodology for assessing the adequacy of models are formulated. The essence of the concept of “adequacy” is revealed and a general characteristic of the methods for analyzing adequacy indicators used in practice is given. The authors present their interpretation of the comprehensive assessment issue for the adequacy of a simulation model aimed at solving a set of information-dependent simulation problems and statistical analysis of characteristics. An extended temporary Petri net is proposed as a basic mathematical scheme for operational modeling of an information and control system for a group of drones, which makes it possible to obtain a set of system characteristics of the research object in terms of queueing networks. The paper substantiates a methodological approach to the problem of comprehensive assessment of the adequacy of the simulation model for a distributed information control system, which consists in decomposing the subject area, identifying a set of information-dependent research tasks, forming a vector criterion of adequacy and subsequently searching for the Pareto-optimal region of a set of controlled parameters of the simulation model. The proposed approach can be useful when selecting and adjusting the simulation model to the tasks of design efficiency of elements of the information control system for a group of drones at the initial stages of its design.

Keywords: unmanned aerial vehicle, group control, distributed information and control system, simulation model, comprehensive assessment of adequacy, vector criteria of adequacy

For citation: Nadezhdin, E.N., Tikhonov, M.A. and Mikheev, K.A. (2024), “Method for assessing the adequacy of the simulation model of a distributed information and control system for a group of UAVs”, *RSUH/RGGU Bulletin. “Information Science. Information security. Mathematics” Series*, no. 4, pp. 40–57, DOI: 10.28995/2686-679X-2024-4-40-57

Введение

Современный этап научно-технического прогресса характеризуется выдающимися достижениями и инновациями в прикладных областях электроники, автоматики и робототехники. Полученные здесь технические решения открывают новые возможности для успешной реализации актуальных задач в интересах экономики, бизнеса, экологии, социальной сферы. Одним из перспективных направлений развития отечественной науки и техники является создание и развитие беспилотной авиации. Сегодня реальным стало широкое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения назревших проблем в различных сферах народного хозяйства. При этом наибольший полезный эффект, как показала практика, достигается при групповом использовании БПЛА.

Обзор публикаций предметной области

Разработка и апробация наукоемких проектов, связанных с групповым применением БПЛА, предполагает проведение комплекса поисковых и исследовательских работ, требующих привлечение значительных инвестиций. В этой связи логичным и обоснованным является использование на этапе эскизного проектирования метода математического моделирования как основного инструмента исследования. К настоящему времени накоплен богатый опыт разработки и компьютерной реализации математических моделей в задачах исследования операций [Надеждин, Смирнова 2013б] и системного анализа [Волкова, Денисов 2001] сложных технических систем. Продолжают активно развиваться методы и алгоритмы, ориентированные на моделирование систем распределенной обработки данных [Надеждин, Смирнова 2010; Надеждин, 2014]. На базе операционных моделей построены современные когнитивные технологии и инструментальные средства прогностической оценки проектной эффективности элементов систем группового управления БПЛА [Надеждин, Котова 2024].

Наличие множества математических схем и опыта их успешной реализации дает широкие возможности для выбора наиболее рационального способа операционного моделирования процесса управления группой БПЛА, выполняющей сложное полетное задание. Однако по-прежнему острой остается проблема определения степени адекватности используемых математических моделей. Это в значительной степени связано с недостатком экспериментальных данных, на базе которых традиционно решаются задачи статистической идентификации сложных динамических систем [Мхитарян 2012]. Другим фактором, определяющим трудности при построении корректных математических моделей (ММ), является уникальность исследуемой системы управления и реализуемых в ней технических идей и конструкторских решений.

Как показал анализ доступных источников, наибольшие перспективы для практического использования имеют системы децентрализованного управления группой и роем БПЛА [Надеждин 2024]. В таких информационно-управляющих системах (ИУС) минимизируется роль центрального пункта управления, и координацию движения группы БПЛА на траектории осуществляет дрон-лидер, бортовая аппаратура которого при этом имеет для этого дополнительные возможности. Принципы построения и функционирования децентрализованных интеллектуальных систем группового управления БПЛА нашли отражение в ряде исследований [Евдокименков, Красильщиков, Себряков 2016].

Важной особенностью ИУС группой БПЛА является наличие распределенной подсистемы информационного обмена между активными дронами в рабочей группе. При этом в интересах обеспечения высокой помехозащищенности и устойчивости процесса траекторного управления в перспективных ИУС реализуются принципы технологии блокчейн [Глазырин 2024]. В результате такой модернизации ИУС существенно усложняется функционал бортовой аппаратуры и, соответственно, формальные схемы моделирования процесса управления БПЛА.

Постановка задачи исследования

В нашей работе в качестве объекта исследования рассматривается системотехнический комплекс (СТК) МЧС, предназначенный для дистанционного мониторинга местности и объединяющий радиоэлектронные средства зондирования и программно-технические средства, которые размещены на наземной мобильной платформе и на борту группы однотипных БПЛА. Предположим, что группа БПЛА СТК предназначена для совместного видеонаблюдения и контроля состояния крупного лесного массива в целях выявления и локализации очагов возгорания.

После выведения группы БПЛА в район ответственности (по результатам целеуказания с наземного пункта управления) координация действий БПЛА производится в режиме децентрализованного управления в соответствии с полетным заданием. При этом управление согласованным движением БПЛА в группе осуществляет информационно-управляющая система, которая является базовым элементом (подсистемой) СТК. ИУС в силу многофункциональности, нестационарности параметров и наличия распределенной архитектуры будем классифицировать как сложную динамическую систему. Обмен данными между бортовыми системами дронов осуществляется в соответствии с протоколами технологии блокчейн, а цифровая обработка информации о пространственном положении и текущем функциональном состоянии каждого дрона в отдельности и группы дронов в целом осуществляется на основе алгоритмов интеллектуального анализа данных. В этих условиях построение полной математической модели, охватывающей полный функционал ИУС, в замкнутой форме затруднительно. Более продуктивной и прагматичной является концепция создания комплекса имитационных моделей, которые предназначены для симуляции различных функций и режимов работы БПЛА на различных этапах их работы.

Прогностическая оценка и выбор принципиальных конструкторских решений подсистем (элементов) при создании проектов СТК, отвечающих совокупности заданных тактико-технических требований, производится на базе методологии системного подхода. Одним из перспективных направлений системных исследований СТК является теория проектной эффективности [Надеждин 2007].

Напомним, что в соответствии с базовыми положениями теории проектной эффективности в создании СТК выделяют два основных направления исследований: проектное (конструкторское) и тактическое.



Рис. 1. Типовая блок-схема решения основной задачи проектной эффективности

На рис. 1 представлена типовая блок-схема решения основной задачи проектной эффективности. Эта обобщенная задача (точнее, комплекс информационно-зависимых задач) заключается в выборе рациональной структуры и параметров заданного элемента СТК, опираясь на результаты операционного моделирования его работы с учетом воздействия факторов реальной внешней среды.

Важным компонентом в методологии решения задач проектной эффективности элементов СТК является комплекс операционных моделей (КОМ), ядро которого составляют аналитические модели проектных решений и имитационные модели функционирования.

Одним из важнейших требований, реализуемых на этапе эскизного проектирования ИУС БПЛА, является адекватность модельного представления процесса ее функционирования в условиях воздействия определяющих внутренних и внешних факторов.

Целью статьи является обоснование методического подхода к задаче комплексной оценки адекватности имитационной модели, предназначенной для решения задач анализа проектной эффективности элементов ИУС группой БПЛА на этапе ее эскизного проектирования.

Подходы к оцениванию адекватности математических моделей

В общем случае под *адекватностью* (от лат. *adaequatus* – приравненный) понимают степень соответствия математической модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится [Надеждин, Смирнова 2013а]. На практике степень адекватности модели традиционно определяют на основе количественной оценки соответствия ее свойств (характеристик, режимов работы, показателей) реальной системе (или объекту) [Советов, Яковлев 1985]. Как известно, содержание понятия адекватности модели существенно зависит от характера предметной области и степени изученности реальной системы.

Для конкретизации задачи исследования рассмотрим укрупненную модель информационной системы, которая используется для определения оптимального набора параметров управления. Предположим, что выходом управляемого объекта является скаляр y , который связан с входными воздействиями, вектором Z и возмущающими воздействиями $F = (f_1, \dots, f_r)$ соотношением $y = g(Z, F)$, где $F(\cdot)$ – функция, определяемая структурой объекта и, как правило, априорно неизвестная вследствие сложности и малой изученности протекающих в объекте процессов.

Пусть модель представляет собой аппроксимацию истинной зависимости по результатам наблюдений выхода y_i , ($i = 1, \dots, N$) объекта от входных воздействий z_i , полученных в ходе эксплуатации объекта: $y = \varphi(Z, x)$, где φ – заданный вид функции; $x = (x_1, \dots, x_n)$ – неизвестные параметры модели.

Отличие математической модели от описания реального объекта количественно можно охарактеризовать суммой квадратов отклонений

$$R(g, \varphi) = \sum_{i=1}^N [y_i - \varphi(z_i, x)]^2.$$

Построение модели (оператора) $\varphi(\cdot)$, наилучшим образом согласованной с описанием реального объекта и обеспечивающей минимум различия $R(g, \varphi)$, сводится к решению математической задачи оценки вектора параметров x методом наименьших квадратов. При этом можно считать, что модель с набором параметров x будет адекватной в рамках принятых дисциплинирующих условий.

В качестве базы для нахождения различий используются, как правило, результаты натурных испытаний или данные наблюдения за поведением реального объекта. Это характерно для подконтрольной эксплуатации функционирующих, т. е. существующих, информационных систем, в ходе которой формируется моделирующая структура (модель), которая и согласуется с наблюдаемым поведением системы. Поэтому проверка адекватности модели реальному объекту первого типа осуществляется путем обоснованного введения значения допустимого отклонения $R_{доп}$ и сравнением вычисленного значения рассогласования $R(g, \varphi)$ с этим допустимым значением. При этом отклонение $R_{доп}$ можно интерпретировать как показатель, характеризующий размеры области допуска.

В нашем случае ИУС существует только в виде концептуальной модели. В отличие от функционирующей системы, концептуальное описание проектируемой системы задает ее предполагаемую структуру с помощью схем, логических и математических соотношений, моделирующих работу отдельных узлов системы и воздействие окружающей среды. Эти соотношения могут быть обоснованы теоретически на основе использования фундаментальных законов различных областей знаний или посредством экспериментального (стендового) исследования функционирующих подсистем – элементов проектируемой системы.

Таким образом, построение модели сводится здесь не к подбору математических формул, согласующихся с наблюдаемым поведением системы, а к упрощению намеченной проектировщиком структуры системы до такой степени, чтобы сделать возможным

ее экспериментальное исследование на ЭВМ. Основные трудности при проверке адекватности модели и концептуального описания возникают из-за того, что нельзя точно определить различия между моделью и проектируемым объектом. В нашем случае найти эталон для процедуры анализа адекватности показателей эффективности весьма сложно. Обоснованным будем считать подход к определению адекватности модели объекту с помощью косвенных методов, в которых сопоставляются результаты моделирования одного и того же объекта, полученные в различных математических схемах или на основе экспертных оценок.

Как отмечалось выше, ИУС как сложная система и как объект исследования характеризуется следующими признаками: динамичность; многофункциональность и полирежимность; наличие множества взаимосвязей; многокритериальность; адаптируемость (самоорганизация); стохастичность; нестационарность (переменность параметров). В силу этих особенностей возникает укрупненная проблема $P = (P_1, P_2)$ обеспечения (на этапе проектирования) адекватности математических моделей.

Подпроблема P_1 разработки адекватной модели состоит в сложности построения корректного математического описания в рамках существующих математических схем. Основные трудности здесь возникают при декомпозиции исходной задачи на подзадачи и при идентификации выделенных характеристик ИУС и ее базовых компонентов, взаимосвязей с внешней средой при компромиссном удовлетворении требований к сложности формализации, качеству отображения реальных характеристик и удобству интерпретации результатов моделирования. Решение проблемы адекватности усложняется из-за отсутствия полной и достоверной информации о функционировании прототипа ИУС на этапе ее эскизного проектирования. Решение подпроблемы P_1 может заключаться в выборе гибкой математической схемы или нескольких математических схем для формального описания ИУС.

Подпроблема P_2 обеспечения адекватности модели ИУС состоит в практической невозможности в рамках одной модели формально отобразить основные режимы функционирования (и/или фазы операции), которая относится к классу распределенных информационных систем с переменной структурой. В ИУС должен быть предусмотрен механизм поддержания устойчивости управления в условиях изменения состава группы из-за сбоев в бортовой аппаратуре или падения БПЛА. Данная ситуация приводит к необходимости адаптации и настройки разработанных моделей по мере получения новых данных о функционировании реальной системы.

Таким образом, оценка адекватности моделей ИУС группой БПЛА должна осуществляться многократно для всех основных фаз операции, связанной с поэтапным выполнением полетного задания.

Один из наиболее распространенных способов формального подтверждения (или обоснования) адекватности используемой ММ заключается в привлечении методов математической статистики. Суть этих методов заключается в проверке выдвинутой гипотезы (в данном случае – об адекватности модели) на основе известных статистических критериев. При проверке гипотез необходимо иметь в виду, что статистические критерии в принципе не могут доказать ни одной гипотезы – они могут лишь указать на отсутствие опровержения.

Представленные в специальной литературе методики оценки адекватности основаны на сравнении измерений на реальной системе и результатов экспериментов на модели. Наиболее распространенные способы оценки адекватности изложены в работе [Наеждин, Смирнова 2013а].

Для обоснования формальной модели распределенной ИУС воспользуемся рекомендациями теории дискретных потоковых систем. В качестве базовой математической схемы выберем расширенную временную сеть (РВС) Петри, математический аппарат которой описан в работе [Наеждин, Смирнова 2013б]. РВС Петри зададим кортежем:

$$N = \langle P, T, F, M_0, E, Q, R \rangle.$$

Здесь $\langle P, T, F, M_0 \rangle$ – базовая сеть Петри, где

P – непустое множество элементов сети – позиций;

T – непустое множество элементов сети – переходов;

$F : P \times T \cup T \times P$ – отношение инцидентности;

$M_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ – начальная разметка сети;

$E : F \rightarrow \{0, 1\}$ – функция, задающая вес всех дуг сети, причем вес дуги определяет ее тип;

Q – множество описаний позиций сети.

Операционная модель на базе РВС Петри позволяет через анализ изменения маркировки вычислить группу системных показателей ИУС, представленных в терминах теории сетей массового обслуживания: информационную производительность, среднее время обработки одного запроса, вероятность безотказной работы, среднее количество одновременно решаемых задач и др. Эти показатели могут быть использованы в качестве частных показателей для оценки адекватности модели.

Пусть при решении основной задачи проектной эффективности ИУС установлена группа частных показателей эффективности W_1, W_2, \dots, W_p , каждый из которых соответствует частной задаче операционного моделирования. Допустим, что ни одному из показателей нельзя отдать предпочтение. Такие задачи в системном анализе получили название многоцелевых, а поиск их решений называется векторной оптимизацией [Волкова, Денисов 2001]. С учетом известного понятийного аппарата задача оценки адекватности и последующей настройки ММ может быть интерпретирована как задача векторной оптимизации.

Математически *задача векторной оптимизации* может быть сформулирована следующим образом. Пусть имеется p число критериальных функций $W_1 = \varphi_1(x_1, \dots, x_n)$, $W_2 = \varphi_2(x_1, \dots, x_n)$, ..., $W_p = \varphi_p(x_1, \dots, x_n)$, связывающих частные показатели эффекта W_i , $i = 1, p$ с конструктивными параметрами $x = (x_1, \dots, x_n)$, определенными на множестве D_x . Полагается, что целевые функции ИУС достигаются при стремлении к увеличению всех компонентов W_1, W_2, \dots, W_p вектора эффективности $W = (W_1, \dots, W_p)$. Если среди данных компонентов вектора показателей W оказываются такие W_i , которые требуется уменьшить, то путем замены этих параметров на обратные цель задачи минимизации сводится к указанной выше.

Компоненты вектора эффективности $W = (W_1, \dots, W_p)$ формально можно рассматривать как координаты некоторой точки C в многомерном пространстве. Сама точка C будет соответствовать конкретному проектному решению.

Одним из фундаментальных понятий современной теории принятия решений при наличии векторного критерия является **оптимальность** решения *по Парето*. Известный термин представляет собой обобщение понятия точки максимума критериальной функции на случай нескольких целевых функций. Решение считают Парето-оптимальным, если значение любого частного критерия можно улучшить лишь за счет ухудшения значений некоторых других критериев. Отметим прикладную значимость численных процедур выделения множества Парето и множества компромиссов, поскольку они могут быть использованы при оценке качества рабочей имитационной модели ИУС и включаться в процедуру ее оптимизации или настройки.

Опираясь на результаты аналитического обзора, модель задачи комплексной оценки адекватности комплекса операционных моделей представим в виде кортежа (1):

$$H = (D, Z, X, F, W, R), \quad (1)$$

где D – предметная область операционного моделирования;

$Z = (z_1, \dots, z_m)^T$ – множество частных задач операционного моделирования;

$X = (x_1, \dots, x_n)^T$ – множество изменяемых параметров в операционных моделях;

F – множество частных показателей для задач моделирования;

L – предпочтения ЛПР;

Q – оператор функционального преобразования;

$W = (W_1, \dots, W_m)^T$ – обобщенный показатель эффективности;

R – рекомендации по применению или настройке параметров комплекса операционных моделей.

Содержательная постановка задачи имеет следующий вид.

Руководствуясь требованиями технического задания и принятой стратегией исследования проектной эффективности элементов СТК, необходимо выполнить декомпозицию предметной области D операционного моделирования и выделить множество $Z = (z_1, \dots, z_m)^T$ частных задач моделирования, определить для каждой задачи частный показатель эффективности F_k ; далее на основе известного оператора преобразования Q и предпочтений ЛПР L синтезировать обобщенный (или векторный показатель) эффективности $W = (W_1, \dots, W_m)^T$ и сопоставить его с эталонным значением обобщенного показателя, отвечающего известным требованиям, оценить приемлемость достигнутого уровня адекватности и, при необходимости, сформировать рекомендации R по настройке операционных моделей путем изменения их управляемых параметров x_j , $j = 1, \dots, n$.

Предположим, что для количественной оценки комплексной адекватности КОМ используется некоторая вспомогательная информационная система, в которой реализованы для этого соответствующие алгоритмы, процедуры и сервисы. Функционал такой информационной системы представим с помощью диаграмм, построенных в нотации IDEF0.

На рис. 2 показана контекстная диаграмма, визуально раскрывающая сущность задачи комплексной оценки адекватности комплекса операционных моделей.

Основанием для постановки задачи анализа адекватности являются требования к адекватности операционных моделей, содержащиеся в техническом задании на создание СТК. В качестве исходных данных для проведения анализа используется вся доступная информация о конструкции компонентов СТК и связей между ними, а также о внутренних и внешних факторах, включая статистические характеристики внешней среды, в которой реализуется миссия СТК. Результатом решения задачи анализа адекватности будут оценки достигнутого уровня операционных моделей

и, при необходимости, рекомендации по настройке управляемых параметров операционных моделей.

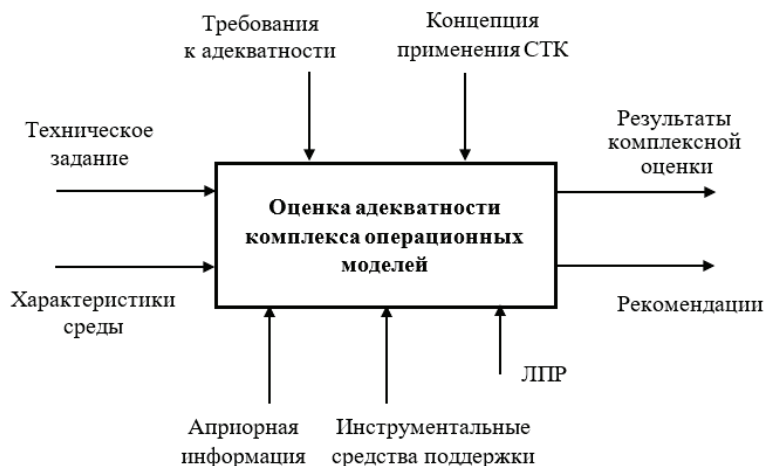


Рис. 2. Контекстная диаграмма функциональной модели системы комплексной оценки адекватности КОМ

На рис. 3 приведена IDEF0-диаграмма 1-го уровня, раскрывающая состав и связи между функциональными блоками (компонентами) указанной информационной системы.

В соответствии с рис. 3 ключевыми компонентами информационной системы являются: 1) модуль декомпозиции предметной области; 2) модуль выделения и конкретизации частных показателей, характеризующих результаты решения частных задач операционного моделирования; 3) модуль (прогностических) расчетов и реализации вычислительного эксперимента; 4) модуль формирования векторного или обобщенного) показателя эффективности; 5) модуль поиска области компромиссов; 6) модуль аналитической обработки и представления (документирования) результатов оценки адекватности.

Задачи оценки количественной адекватности операционных моделей проектируемого СТК и его базовых подсистем в силу своей уникальности и отсутствия общепринятой формальной методики решения предполагают совместное использование вычислительных алгоритмов и эвристических процедур. На рис. 3 эта особенность отражена через связи блоков 1, 2, 4 и 5 с исследователем – лицом, принимающим решение (ЛПР).



Рис. 3. Функциональная модель системы оценки адекватности КОМ в виде диаграммы 1-го уровня в нотации IDEF0

Дополнительно отметим, что показатель эффективности $W(\cdot)$ в нашем случае представляет собой вектор, составляющие которого функционально связаны с частными показателями эффективности, отождествляемыми с результатами реализации соответствующих частных задач операционного моделирования.

Выводы

Таким образом, для выбора перспективных конструкторских решений и рациональных проектных параметров информационно-управляющей системы группы БПЛА в рамках методологии

проектной эффективности необходимо поддерживать на заданном уровне адекватность используемых операционных моделей. В статье предложен методический подход к задаче комплексной оценки адекватности базовой имитационной модели распределенной ИУС, который заключается в выполнении следующих основных действий:

1. Постановка задачи исследования и декомпозиция предметной области.

2. Выделение комплекса информационно-зависимых задач и обоснование для них частных показателей эффективности.

3. Формирование векторного критерия эффективности.

4. Определение Парето-оптимальной области и соответствующего вектора значений управляемых параметров имитационной модели.

5. Обоснование рекомендаций по обеспечению адекватности модели.

При соответствующей конкретизации разработанный подход может быть использован в составе алгоритма многопараметрической настройки имитационной модели на конкретные задачи анализа проектной эффективности элементов ИУС группой БПЛА.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта РГТУ «Информационно-аналитическая система для автоматизированного управления роем беспилотных летательных аппаратов специального назначения» (конкурс «Студенческие проектные научные коллективы РГТУ»).

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the RSUH project “Information-analytical system for automated control of a swarm of unmanned aerial vehicles for special purposes” (competition “Student design research teams of RSUH”).

Литература

- Волкова, Денисов 2001 – Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: Учебник. СПб.: СПбГТУ, 2001. 512 с.
- Глазырин 2024 – Глазырин И.А. Повышение устойчивости системы управления роём беспилотных летательных аппаратов // Вестник РГТУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика». 2024. № 3. С. 8–23.

- Евдокименков, Красильщиков, Себряков 2016 – *Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г.* Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 29–44.
- Мхитарян 2012 – *Мхитарян В.С.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В.С. Мхитарян, В.Ф. Шишов, А.Ю. Козлов. М.: Академия, 2012. 416 с.
- Надеждин 2007 – *Надеждин Е.Н.* Основы теории управления и задачи проектирования систем управления высокоточным оружием: Учебник. Тула: Тульский артиллерийский инженерный институт, 2007. 418 с.
- Надеждин 2014 – *Надеждин Е.Н.* Сетевые модели процессов распределенной обработки данных: аналитический обзор. М.: Информика, 2014. 24 с.
- Надеждин 2024 – *Надеждин Е.Н.* Алгоритмы роевого интеллекта в задачах оптимизации группового управления БПЛА // VII Всероссийская Поспеловская конференция «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы»: Сборник статей по материалам научной конференции (Калининград, 3–7 июня 2024 г.): научное электронное издание / Отв. ред. А.В. Колесников. Калининград; СПб.: РХГА, 2024. С. 361–370.
- Надеждин, Котова 2024 – *Надеждин Е.Н., Котова И.Ф.* Когнитивный подход к анализу проектных решений при разработке интеллектуальной системы управления группой БПЛА // Информатизация образования–2024: Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Липецк, 2024. С. 187–192.
- Надеждин, Смирнова 2010 – *Надеждин Е.Н., Смирнова Е.Е.* Метод моделирования систем организационного управления на основе модифицированной временной сети Петри // Ученые записки ИИО РАО. 2010. Вып. 33. С. 207–220.
- Надеждин, Смирнова 2013а – *Надеждин Е.Н., Смирнова Е.Е.* Методы и алгоритмы оценки адекватности сетевых моделей распределенного информационно-вычислительного процесса в автоматизированной системе управления вузом // Ученые записки ИИО РАО. 2013. Вып. 46. С. 85–101.
- Надеждин, Смирнова 2013б – *Надеждин Е.Н., Смирнова Е.Е.* Методы моделирования и оптимизации интегрированных систем управления организационно-технологическими процессами в образовании: Монография. Тула: ТулГУ, 2013. 250 с.
- Советов, Яковлев 1985 – *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Моделирование систем. М.: Высшая школа, 1985. 271 с.

References

- Evdokimenkov, V.N., Krasilshchikov, M.N. and Sebryakov, G.G. (2016), “Distributed intelligent control system for a group of unmanned aerial vehicles. Architecture and software and mathematical support”, *Bulletin of SFedU, Technical sciences*, no. 1 (174), pp. 29–44.

- Glazyrin, I.A. (2024), "Increasing the stability of the control system for a swarm of unmanned aerial vehicles", *RSUH/RGGU Bulletin. "Computer science. Information security. Mathematics" Series*, no. 3, pp. 8–23.
- Mkhitarayan, V.S. Shishov, V.F. and Kozlov, A.Yu. (2012), *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika: Uchebnik dlya stud. uchrezhdenii vyssh. prof. obrazovaniya* [Probability theory and mathematical statistics. Textbook for students of higher prof. education institutions], Academia, Moscow, Russia, 416 p.
- Nadezhdin, E.N. (2007), *Osnovy teorii upravleniya i zadachi proektirovaniya sistem upravleniya vysokotochnym oruzhiem: uchebnik* [Fundamentals of control theory and tasks of designing control systems for high-precision weapons. Textbook], Tula Institute of Artillery Engineering, Tula, Russia, 418 p.
- Nadezhdin, E.N. (2014), *Setevye modeli protsessov raspredelennoi obrabotki dannykh: analiticheskii obzor* [Network models of distributed data processing processes: an analytical review], Informika, Moscow, Russia, 24 p.
- Nadezhdin, E.N. (2024), "Swarm intelligence algorithms in UAV group control optimization problems", in Kolesnikov, A.V. (ed.), *VII All-Russian Pospelovskaya Conference "Hybrid and Synergetic Intelligent Systems". Coll. of articles of the Scientific Conference (Kaliningrad, June 3–7, 2024). Electronic publication*, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, St. Petersburg, Russia, pp. 361–370.
- Nadezhdin, E.N. and Kotova, I.F. (2024), "Cognitive approach to the analysis of design solutions in the development of an intelligent control system for a group of UAVs, Informatization of Education – 2024. Coll. of articles of the International Scientific and Practical Conference, Lipetsk, Russia, pp. 187–192.
- Nadezhdin, E.N. and Smirnova, E.E. (2010), "Method for modeling organizational management systems based on a modified temporary Petri net", *Scientific notes of the IIO RAO*, vol. 33, pp. 207–220.
- Nadezhdin, E.N. and Smirnova, E.E. (2013a), "Methods and algorithms for assessing the adequacy of network models of distributed information and computing process in the automated system of university management", *Scientific notes of IIO RAO*, vol. 46, pp. 85–101.
- Nadezhdin, E.N. and Smirnova, E.E. (2013b), *Metody modelirovaniya i optimizatsii integrirrovannykh sistem upravleniya organizatsionno-tehnologicheskimi protsessami v obrazovanii: monografiya* [Methods of modeling and optimization of integrated systems for managing organizational and technological processes in education. Monograph], Tula State University, Tula, Russia, 250 p.
- Sovetov, B.Ya. and Yakovlev, S.A. (1985), *Modelirovanie sistem* [Modeling of systems], Vysshaya shkola, Moscow, Russia, 271 p.
- Volkova, V.N. and Denisov, A.A. (2001), *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza: uchebnik* [Fundamentals of systems theory and systems analysis. Textbook], SPbSTU, St. Petersburg, Russia, 512 p.

Информация об авторах

Евгений Н. Надеждин, доктор технических наук, профессор, Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия; 125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 6; en-hope@yandex.ru

Максим А. Тихонов, аспирант, Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия; 125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 6; Tikhonov.99@yandex.ru

Кирилл А. Михеев, аспирант, Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия; 125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 6; mistermihh@yandex.ru

Information about the authors

Evgenii N. Nadezhdin, Dr. of Sci. (Computer Science), professor, Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia; 6, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia; en-hope@yandex.ru

Maksim A. Tikhonov, postgraduate student, Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia; 6, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia; Tikhonov.99@yandex.ru

Kirill A. Mikheev, postgraduate student, Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia; 6, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia; mistermihh@yandex.ru