

Научная статья
УДК 623.74

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Дмитрий Вячеславович Зимников

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж),
Воронеж, Россия
zx0282@gmail.com

Аннотация. Представлен подход к разработке имитационной модели системы технического обслуживания комплексов с беспилотными летательными аппаратами (КБПЛА). Применение комплексов сопровождается исследованиями, направленными на совершенствование способов применения, повышение тактико-технических характеристик, при этом вопросам выполнения технического обслуживания не уделяется достаточного внимания. Имеющиеся противоречия в теории и практике указывают на необходимость моделирования и анализа различных видов технического обслуживания, выполняемых на КБПЛА. Во время формирования системы технического обслуживания необходимо учитывать большое количество факторов, которые могут повлиять на сроки выполнения и качество работ. При этом практикуется также корректировка программы технического обслуживания в процессе эксплуатации. С целью повышения эффективности применения КБПЛА в системе AnyLogic разработана имитационная модель системы технического обслуживания, позволяющая принять рациональное решение о выборе исполнителей обслуживания, оценить объем загруженности специалистов, а также сформировать требования по рациональному составу необходимых средств технического обслуживания.

Ключевые слова: техническое обслуживание КБПЛА, имитационная модель системы технического обслуживания, система AnyLogic

Для цитирования: Зимников Д.В. Имитационная модель системы технического обслуживания комплексов с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 53–58.

Original article

MAINTENANCE SYSTEM OF COMPLEXES WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES SIMULATION MODEL

Dmitriy V. Zimnikov

MESC Air Force “Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin”
Voronezh, Russia
zx0282@gmail.com

Abstract

Relevance of the research related to the unmanned aerial vehicles is being confirmed by an increased number of their application and planned financial expenditure for the development of modern and prospective complexes with unmanned aerial vehicles. Control methods are being permanently improved, and activities on the performance enhancing of the complexes with unmanned aerial vehicles are in full strength. However, due attention is not paid

to the issues of the complexes technical availability, though many patterns of unmanned aerial vehicles are as good as manned aircraft concerning their mass and volume characteristics.

The existing contradictions in theory and practice indicate the need for modeling and analysis of various types of maintenance performed on complexes with unmanned aerial vehicles. One of the ways to this problem solving consists in developing a simulation model of the maintenance system for complexes with unmanned aerial vehicles. Simulation modeling is by far one of the most effective tools for studying complex systems. Simulation modeling application in many areas of activity has a number of undeniable advantages. Modeling helps to find optimal solutions to problems and ensures a clear understanding of complex systems.

When forming a maintenance system, it is necessary to account for a large number of factors that may affect the timing and quality of work. At the same time, the adjustment of the maintenance program during operation is being practiced as well. Simulation model was developed with the AnyLogic System with a view to increase the efficiency of employing complexes with unmanned aerial vehicles. The said model allows substantiating technological process, rational periodicity of maintenance, adopting rational decision on the maintenance specialists selection, assessing their workload, as well as determining the requirements to the rational set of necessary maintenance equipment.

The developed model accounts for the effect of an extended number of the input indicators and possible states of the technical operation of complexes with unmanned aerial vehicles. The proposed model may be further employed for solving the problems of rational distribution of available resources, increasing the coefficient of technical readiness and forming a rational maintenance system for complexes with unmanned aerial vehicles.

Keywords: unmanned aerial vehicles maintenance, simulation model of maintenance system, AnyLogic

For citation: Zimnikov D.V. Maintenance System of Complexes with Unmanned Aerial Vehicles Simulation Model. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 53–58.

Введение

В настоящее время активно ведутся работы по разработке и исследованию комплексов с беспилотными летательными аппаратами (КБПЛА) [1–3]. КБПЛА обладают преимуществами относительно пилотируемой авиации, такими как отсутствие психофизиологических ограничений в различных условиях, а также способность выполнения задач в труднодоступной местности. Эффективность применения КБПЛА зависит от заложенных эксплуатационных свойств, тактико-технических характеристик, а также от условий эксплуатации.

Актуальность исследования подтверждается расширением использования и повышением интенсивности эксплуатации комплексов. Постоянно совершенствуются способы управления, ведутся работы по улучшению тактико-технических характеристик КБПЛА, однако вопросам технической готовности комплексов не уделяется должного внимания, хотя многие образцы БПЛА по своим массовым и объемным характеристикам уже давно не уступают пилотируемым самолетам. Существующие противоречия в теории и практике указывают на необходимость моделирования и анализа различных видов технического обслуживания (ТО), выполняемых на КБПЛА, и решения связанных с этим задач разработки и совершенствования математического и программного обеспечения для организации и эксплуатации различных комплексов. В рамках исследования процессов ТО КБПЛА

актуальной является модернизация инструментария, который позволит изучить факторы, влияющие на выполнение различных видов ТО.

Согласно [4], система технической эксплуатации представляет собой совокупность объектов технической эксплуатации, летного и инженерно-технического персонала, средств эксплуатации и устанавливающей правила их взаимодействия документации, необходимых и достаточных для выполнения задач технической эксплуатации. С другой стороны, техническая эксплуатация – это сложный динамический процесс, включающий в себя подготовку техники к полетам, организационное обеспечение ТО и др.

Система ТО изделия авиационной техники (АТ) представляет собой совокупность взаимосвязанных объектов ТО, инженерно-технического персонала, средств ТО и устанавливающей правила их взаимодействия документации с целью обеспечения требуемых уровней надежности и готовности изделия АТ к полетам [4].

На сегодняшний день можно констатировать рост интереса к оптимизации всестороннего обеспечения жизненного цикла АТ. В данном направлении проведены работы, освещенные в статьях [5–7]. Особого внимания заслуживают публикации [8, 9], в них представлено исследование основных факторов, влияющих на выполнение целевой функции во время выполнения полетного задания, при этом вопросы подготовки и выполнения ТО не рассматриваются, что, в свою очередь, не позволяет

в полной мере оценить вероятность своевременного вылета КБПЛА.

Объектом исследования является КБПЛА средней дальности, для которого предусмотрено проведение периодического ТО, с примерным общим временем выполнения работ не менее двух дней. В качестве образца можно рассмотреть комплекс «IAI Searcher», а также его отечественные прототипы и аналоги. Изучая состав типовых комплексов, можно предположить, что для эффективного выполнения задач следует одновременно использовать наземную станцию управления, три БПЛА, электрооптические системы, а также выполнять ТО и мероприятия по восстановлению их работоспособности в случае необходимости. Исследование системы ТО КБПЛА проводится с целью поиска рационального варианта ее функционирования. В качестве варьируемых параметров при этом целесообразно использовать численность персонала, выполняющего технологические операции, а также основные значения периодичности и объемов работ при оперативном и периодическом обслуживании.

При исследовании процессов получил большое распространение марковский процесс с дискретными состояниями системы и непрерывным временем переходов между состояниями. Завершение нахождения в одном из состояний системы характеризуется мгновенным переходом в другое состояние, причем этот переход может быть описан определенной интенсивностью и вероятностью. Статистический анализ и использование марковского процесса показали, что примерное время нахождения элементов КБПЛА в состоянии периодического ТО составляет примерно 35% от продолжительности всего процесса эксплуатации комплекса, что подтверждает необходимость его исследования.

Разработка имитационной модели системы ТО КБПЛА

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 необходимых для исследования системы составе, объеме и области изменения ее параметров [10–12]. Имитационные модели представляют собой комбинацию дискретных, динамических и стохастических элементов. Имитационные модели представляют собой комбинацию дискретных, динамических

и стохастических элементов, поэтому данные модели обычно называют дискретно-событийными.

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, дающие возможность оценить характеристики системы [13, 14]. Имитационное моделирование позволяет осуществлять многократные испытания модели с нужными входными данными, чтобы определить их влияние на выходные критерии оценки работы системы [15–18]. При таком подходе к моделированию компьютер используется для численной оценки модели, а затем с помощью полученных данных можно рассчитать ее реальные характеристики.

Для создания имитационной модели было выбрано программное средство AnyLogic — мощная платформа для имитационного моделирования, которая проявила себя в решении широкого спектра прикладных задач. Одной из основных особенностей AnyLogic является возможность использования трех подходов: системной динамики, дискретно-событийного моделирования и агентно-ориентированного моделирования.

Одной из основных задач имитационной модели является оценка необходимых ресурсов для выполнения различных работ, которая включает:

- расчет трудозатрат на выполнение периодического ТО;
- определение трудозатрат на ремонт вышедших из строя агрегатов и изделий;
- учет ресурсов, необходимых для выполнения операций ТО и ремонта специалистами групп регламента и ремонта;
- расчет необходимых средств ТО для выполнения работ;
- определение ресурсов, связанных с транспортировкой комплекса, его агрегатов и оборудования;
- определение количества расходных материалов, необходимых для обслуживания и ремонта оборудования;
- определение количества энергии и других ресурсов, необходимых для поддержки рабочих мест.

Система обслуживания принимает заявки различного вида с разными вероятностями. Выбор распределения заявок основан на интенсивности отказов и необходимости ремонта для продолжения использования. Есть также плановое ТО, которое учитывает отвлечение специалистов и ресурсов на ремонтные работы. Порядок выполнения операций

определяется приоритетом обеспечения исправных комплексов, готовых к выполнению задач.

Для генерации заявок на проведение работ используется блок «source». Затем заявки проходят через блок «selectOutput», где они распределяются на периодическое ТО и ремонт. Если заявка относится к первому типу, она дублируется с помощью блока «split» и направляется в три параллельные ветви, соответствующие различным специальностям группы по регламенту и ремонту. Затем происходит захват необходимых ресурсов для выполнения работ по ТО в соответствии с технической документацией. Заявки задерживаются на промежуток времени, соответствующий продолжительности работ, а захваченные ресурсы освобождаются с помощью блока «service».

После завершения всех работ, в блоке «batch» происходит объединение трех заявок в одну и их уничтожение, что завершает полный цикл процесса ТО. Блок «sink» отвечает за сбор статистики выполненных работ периодического ТО. Работы, связанные с ремонтом комплекса, также завершаются блоком «sink1», который отвечает за сбор статистики выполненных работ по ремонту.

В качестве анализа загруженности групп регламента и ремонта представлена программная реализация распределения общих ресурсов, отражающая в динамике изменение количества специалистов в группах (gr_1, gr_2, gr_3), а также требуемых средств ТО (STO_1, STO_2, STO_3) для выполнения работ по каждой из специальностей (рис. 1). Используя предоставленные данные, мы сможем вычислить коэффициент загрузки для каждого типа ресурса и определить оптимальный состав сил и средств для выполнения различных видов ТО.

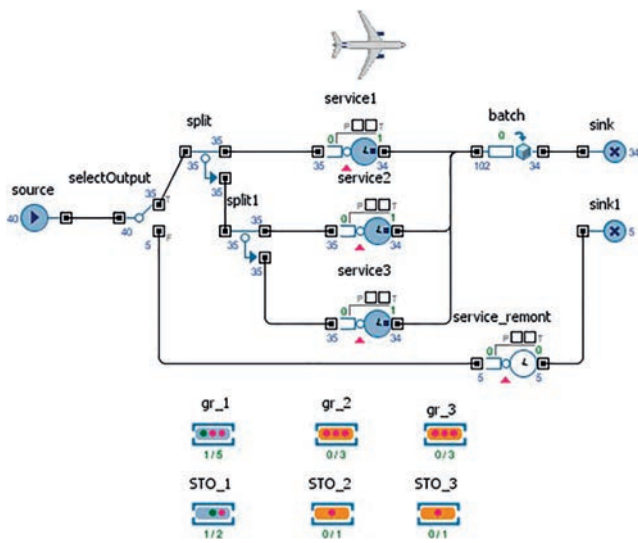


Рис. 1. Структура имитационной модели выполнения периодического ТО и ремонта на КБПЛА

Модель процесса ТО и ремонта представлена совокупностью процессных диаграмм, позволяющих описать процессы в целом [6, 19–20]. Одной из основных особенностей их взаимосвязи является совместное использование общих ресурсов, таких как персонал и технические средства обслуживания, в соответствии с определенными приоритетами. Это дает возможность получить полное описание системы в целом. Таким образом, модель определяет требования к последовательности проведения работ и их приоритетности.

Результаты моделирования представлены в виде временной диаграммы занятости личного состава эксплуатирующей организации (рис. 2), что позволяет в режиме реального времени наблюдать текущую загруженность.

В дальнейших исследованиях целесообразно проанализировать загруженность применяемых средств ТО, интенсивность использования запасных частей и материалов, а также простои, связанные с отправкой элементов КБПЛА в заводской ремонт. Использование расширенного спектра данных, полученных в рамках сбора статистики за весь период эксплуатации КБПЛА, позволит корректировать программу ТО, оптимизируя при этом используемые силы и средства ТО.

На основе полученных результатов необходимо найти обобщенные значения для структуры системы ТО КБПЛА, которые позволят принимать управленческое решение о перераспределении и планировании работ. Данная информация является научно обоснованным базисом для принятия решений по формированию нового облика системы ТО КБПЛА, учитывающего состав и интенсивность применения средств ТО с заданными ограничениями. После проведения необходимого количества экспериментов выбирается рациональное решение с корректировкой элементов системы ТО (рис. 3).

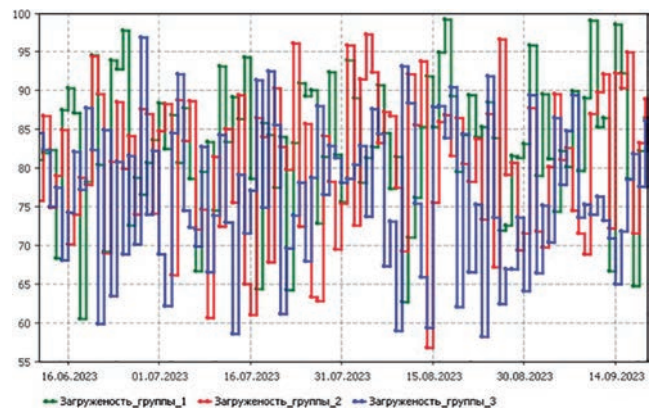


Рис. 2. Временная диаграмма занятости личного состава групп регламента и ремонта



Рис. 3. Схема формирования системы ТО КБПЛА

Выводы

Представленная имитационная модель позволит обосновать технологический процесс, периодичность и трудозатраты различных видов ТО, выполняемых на КБПЛА. В разработанной модели, в отличие от существующих, учтены влияние расширенного количества входных показателей и возможные состояния технической эксплуатации КБПЛА. Практическая значимость заключается в возможности количественной оценки влияния основных факторов на показатели эффективности ТО, в целях рациональной выработки ресурса и выполнения поставленных перед комплексом задач. Предложенный аппарат может быть в дальнейшем использован при решении задач рационального распределения имеющихся в наличии ресурсов, повышения коэффициента технической готовности и формирования рациональной системы ТО КБПЛА.

Список источников

1. Балык В.М., Бородин И.Д. Выбор устойчивых проектных решений беспилотного летательного аппарата в условиях действий факторов неопределенности // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 57–66. DOI: 10.34759/vst-2022-1-57-66
2. Лунанчук В.Ю. Система оптического наблюдения беспилотного летательного аппарата и метод ее стабилизации // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 184–200. DOI: 10.34759/vst-2022-1-184-200
3. Головнев А.В., Воронко Д.С., Данилов С.М. Исследование аэродинамической интерференции беспилотных летательных аппаратов при изменении высоты и интервалов в групповом полете // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 36–44. DOI: 10.34759/vst-2023-1-36-44
4. Самуленков Ю.И., Яблонский С.Н., Босых Н.Н. Основы технической эксплуатации авиационной техники: Учебное пособие. – Воронеж: Мир, 2019. – 80 с.
5. Долгов О.С., Сафоклов Б.Б. Проектирование модели технического обслуживания и ремонта воздушных судов с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 19–26. DOI: 10.34759/vst-2022-1-19-26
6. Железняков А.О., Сидорчук В.П., Подрезов С.Н. Имитационная модель системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного оборудования // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: 10.34759/trd-2022-123-26
7. Степанов В.П., Сафин А.М., Карпенко О.Н., Трофимчук М.В. Войсковой ремонт в системе технической эксплуатации на современном этапе развития авиационной техники // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 238–245.
8. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р. Имитационное моделирование характеристик комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4(12). С. 16–23.
9. Власов А.И., Григорьев П.В., Кривошеин А.И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2(22). С. 26–35. DOI: 10.21685/2307-4205-2018-2-4
10. Абашев О.В., Куприков М.Ю. Применение искусственных нейронных сетей при проектировании самолетов // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 5. С. 27–33.
11. Лимановская О.В. Имитационное моделирование в AnyLogic 7: Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2017. – 152 с.
12. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование /Пер. с англ. под ред. В.Н. Томашевского. – 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. – 847 с.
13. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: Учебное пособие. – 5-е изд., стер. – М.: КноРус, 2014. – 448 с..
14. Матальцкий М.А. Элементы теории случайных процессов: Учебное пособие. – Гродно: ГрГУ, 2004. – 326 с.
15. Четко 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. Верещиков Д.В., Волошин В.А., Иващенко 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>
17. Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1969. – 324 с.
18. Боев В.Д. Компьютерное моделирование. – СПб.: Военная академия связи, 2014. – 432 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. Поленин В.И., Бондаренко И.В., Бассауэр А.А. Имитационное моделирование жизненного цикла

радиоэлектронных систем вооружения кораблей // Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения: Сборник трудов I всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в военной сфере (ИМСВН; 25 ноября 2020; Санкт-Петербург). СПб.: ВА МТО – АО «ЦТСС», 2020. С. 211–218.

References

1. Balyk V.M., Borodin I.D. Selection of stable design solutions for unmanned aerial vehicle under conditions of uncertainty factors action. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 57–66. DOI: 10.34759/vst-2022-1-57-66
2. Lupanchuk V.Y. Optical surveillance system of unmanned aerial vehicle and a method of its stabilization. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 184–200. DOI: 10.34759/vst-2022-1-184-200
3. Golovnev A.V., Voronko D.S., Danilov S.M. Studying aerodynamic interference of the unmanned aerial vehicles at the intervals and height variation in team flight. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 36–44. DOI: 10.34759/vst-2023-1-36-4
4. Samulenkov Yu.I., Yablonskii S.N., Bosykh N.N. *Osnovy tekhnicheskoi ekspluatatsii aviatsionnoi tekhniki* (Fundamentals of technical operation of aviation equipment), Voronezh, Mir, 2019, 80 p.
5. Dolgov O.S., Safoklov B.B. Developing maintenance and refurbishment model of aerial vehicles with artificial neural network applicaion. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 19–26. DOI: 10.34759/vst-2022-1-19-26
6. Zheleznyakov A.O., Sidorchuk V.P., Podrezov S.N. Simulation model of the system of maintenance and repair of electronic equipment. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. DOI: 10.34759/trd-2022-123-26
7. Stepanov V.P., Safin A.M., Karpenko O.N., Trofimchuk M.V. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2020, no. 16, pp. 238–245.
8. Poltavskii A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2015, no. 4(12), pp. 16–23.
9. Vlasov A.I., Grigor'ev P.V., Krivoshein A.I. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2018, no. 2(22), pp. 26–35. DOI: 10.21685/2307-4205-2018-2-4
10. Abashev O.V., Kuprikov M.Yu. An application of artificial neural networks in aircraft design. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 5, pp. 27–33
11. Limanovskaya O.V. *Imitatsionnoe modelirovanie v AnyLogic 7* (Simulation modeling in AnyLogic 7), Ekaterinburg, Ural'skii universitet, 2017, 152 p.
12. Law A.M., Kelton W.D. *Simulation modelling and analysis*. 5th edition, McGraw Hill; 2014, 804 p.
13. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* (Theory of random processes and its engineering applications), 5th ed. Moscow, KnoRus, 2014, 448 p.
14. Matalytskii M.A. *Elementy teorii sluchainykh protsessov* (Elements of the theory of random processes), Grodno, GrGU, 2004, 326 p.
15. Chepko I.N., Bogomolov D.V., Karpenko O.N. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100823>
16. Vereshchikov D.V., Voloshin V.A., Ivashkov S.S., Vasil'ev D.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91926>
17. Ovcharov L.A. *Prikladnye zadachi teorii massovogo obsluzhivaniya* (Applied problems of the theory of queuing), Moscow, Mashinostroenie, 1969.
18. Boev V.D. *Komp'yuternoe modelirovanie* (Computer modeling), St. Petersburg, Voennaya Akademiya Svyazi, 2014, 432 p.
19. Badalov A.Yu., Razumov D.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93491>
20. Polenin V.I., Bondarenko I.V., Bassauer A.A. *Materialy I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v voennoi sfere "Imitatsionnoe modelirovanie sistem voennogo naznacheniya, deistvii voisk i protsessov ikh obespecheniya: sbornik trudov" (IMSVN; 25 November 2020; St. Petersburg)*, St. Petersburg, VA MTO – АО "TsTSS", 2020, pp. 211–218.

Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 28.08.2023.

The article was submitted on 13.06.2023; approved after reviewing on 28.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023.