

Научная статья
УДК 623.74
DOI: [10.34759/trd-2022-123-26](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-26)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Артем Олегович Железняков^{1✉}, Владимир Петрович Сидорчук²,
Семен Николаевич Подрезов³

^{1,2,3}ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
(г. Воронеж), Россия

¹artem.artemov48@mail.ru✉

²sidorchukvova@gmail.com

³podrezovsn@mail.ru

Аннотация. В статье приведен краткий анализ существующих имитационных моделей сложных систем, в различных средах. Ввиду возросшей технической сложности бортового оборудования, установленного на летательных аппаратах, возникает проблема в качественном и своевременном техническом обслуживании, и ремонте, поэтому при организации данных видов деятельности необходимо учитывать большое количество факторов, которые могут повлиять сроки выполнения и качество работ. Для решения этих задач, на основе обобщенной статистической информации об отказах, в системе AnyLogic разработана имитационная модель процесса организации, функционирования и ремонта блоков со всеми влияющими на

него внешними и внутренними условиями, позволяющая принять рациональное решение о выборе места ремонта, оценить объём загруженности специалистов при выполнении различных видов работ, а также сформировать требования по рациональному составу и количеству запасных частей изделий авиационной техники, требуемых для оперативного восстановления работоспособности.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта, имитационная модель, авиационная техника, AnyLogic

Для цитирования: 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](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-26)

SIMULATION MODEL OF THE SYSTEM OF MAINTENANCE AND REPAIR OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Artem O. Zheleznyakov¹✉, Vladimir P. Sidorchuk², Semyon N. Podrezov³

^{1,2,3}MESC Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin»,

Voronezh, Russia

¹artem.artemov48@mail.ru✉

²sidorchukvova@gmail.com

³podrezovsn@mail.ru

Abstract. 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 advantages of this method are: simplicity, visibility, cheapness (compared to the experiment with recreating a real model), speed and convenience. The article provides a brief analysis of existing simulation models of complex systems in various environments. Due to the increased technical complexity of on-board equipment installed on aircraft, there is a problem in high-quality and timely maintenance and repair, therefore, when organizing these types of activities, it is necessary to take into account a large number of factors that can affect the timing and quality of work. To solve these problems, on the basis of generalized statistical information about failures, the AnyLogic system has developed a simulation model of the process of organizing, functioning and repairing blocks with all the external and internal conditions affecting it, which allows making a rational decision about choosing a repair site, assessing the workload of specialists when performing various types of work, as well as forming requirements for the rational composition and quantity of spare parts of aircraft products required for operational restoration of operability.

Keywords: maintenance and repair system, simulation model, aviation equipment, AnyLogic

For citation: 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](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-26)

Система технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) авиационной техники (АТ) представляет собой совокупность взаимосвязанных средств, документации ТО и Р и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления (качества либо эксплуатационных характеристик) объектов, входящих в эту систему [1, 2]. При этом качество функционирования системы ТО и Р зависит от внутренних и внешних условий. Под внутренними условиями понимается качество функционирования каждой из ее составных частей, например, для инженерно-технического персонала – уровень его квалификации и технологической дисциплинированности, для объекта ТО и Р – уровень его эксплуатационно-технических характеристик, для технико-эксплуатационной части (ТЭЧ) – это уровень ее совершенства и полноты соответствия действующим требованиям технологических процессов ТО и Р, и т.д. Внешние условия функционирования системы ТО и Р определяются её инфраструктурой, так как она объединяет всю совокупность производственных процессов ТО и Р, то инфраструктура объединяет комплекс мероприятий и смежных служб, обслуживающих производственные процессы ТО и Р, выполняемые непосредственно в рамках системы. К ним можно отнести материально-техническое обеспечение процесса ТО и Р, подготовку и переподготовку инженерно-технического персонала, информационное обеспечение процессов ТО и Р с созданием базы данных и т.д. Учет всех условий приводит к наличию больших объемов разнородной

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. Это связано, в первую очередь, с многообразием сложных технологических систем, в ходе реализации, которых могут изменяться параметры их функционирования и структура технологического цикла, а также необходимость учета человеческого фактора при выполнении работ на АТ. Единственной технологией, обладающей возможностью структурной реконфигурации технологического процесса, остается технология имитационного моделирования, применяемая ко всему спектру задач синтеза оптимальной структуры сложных технических систем [3-5].

При решении задачи моделирования системы ТО и Р был проведен анализ имитационных моделей функционирования систем войскового ремонта (СВР) и систем ТО и Р АТ который показал, что большинство существующих имитационных моделей выполнены с помощью программных средств моделирования 4-го поколения (GPSS PC) и не позволяют выполнить оценку эффективности функционирования СВР и ТО и Р в динамике, с учетом влияния на систему различных факторов, таких как наличие сервисных организаций, различной степени оснащенности ремонтных органов необходимыми средствами технического обслуживания и войскового ремонта, документацией, личным составом, запасными частями и материалами [4].

Весь комплекс операций по ТО и Р можно условно разделить на две группы: плановые профилактические работы (регламентные работы), работы по обнаружению и устранению уже имеющих место отказов и повреждений. Главное

требование, предъявляемое к процессу технической эксплуатации в целом, состоит в том, чтобы в условиях ограниченных ресурсов обеспечить требуемое количество боеготовых ВС.

Предлагаемая имитационная модель предназначена для решения задач мониторинга функционирования системы ТО и Р со всеми влияющими на нее внешними и внутренними факторами, и принятия рационального решения о выборе места ремонта, оценивания объёма загруженности специалистов при выполнении различных видов работ, анализа и оценки необходимого количества необходимых ресурсов для последующего обеспечения жизненного цикла изделий, а также сформировать требования по рациональному составу и количеству запасных частей изделий АТ, требуемых для оперативного восстановления работоспособности АТ, агрегатным способом ремонта.

В ходе эксплуатации АТ по назначению возникают заявки на выполнение технического обслуживания, а также заявки на выполнение ремонтных работ для устранения отказов, которые оперативно выполняются в авиационной эскадрильи (АЭ) агрегатным методом ремонта. Агрегатный метод ремонта – это обезличенный метод ремонта, при котором неисправные составные части объекта заменяются новыми или заранее отремонтированными, т.е. отказавший блок из состава изделия, заменяется исправным. Исправные блоки для агрегатного метода ремонта берутся из оборотного фонда («техническая аптечка»), предварительно сформированного представителями авиационной промышленности, а неисправные блоки направляются для ремонта в ТЭЧ или на ремонтные предприятия [6].

В качестве исходных данных в модели выступает обобщенная статистическая информация об отказах АТ, наблюдаемая за продолжительный период времени, полученная путем анализа карточек учета неисправностей. Исходные данные загружаются в модель файлом формата MSExcel, внешний вид фрагмента которого представлен на рисунке 2. Основными полями БД (исходными данными модели) являются:

– наименование радиоэлектронного оборудования, входящего в состав АТ («Наименование блока»);

– наименование специальности, ответственные за ремонт радиоэлектронного оборудования в АЭ и ТЭЧ («Специальность АЭ», «Специальность ТЭЧ»);

– класс функциональной значимости оборудования («Significance») [6];

– булева переменная, характеризующая ремонтпригодность блока в условиях эксплуатирующей организации («Ремонт в в/ч»);

– время необходимое для выполнения ремонта («T_rem [час.]», «T_rem [дн.]»);

– время необходимое для проверки работоспособности блоков, после выполнения ремонта («Ttest_chek»);

– стоимость ремонта блоков («\$_rem [усл.ед.]»);

– количество отказов за наблюдаемый промежуток времени («Кол-во отказов»);

– интенсивность отказов радиоэлектронного оборудования («Totkaz_sr», «Интен.»).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
		Наименование блока	Специальность ТЭЧ	Специальность АЭ	Significance	Ремонт в в/ч	T_rem, час.	T_rem, дн.	Ttest_chek	S_rem, усл.ед.	Totkaz_sr	Кол-во отказов	Интен.
1	1	Блок прием	GORSO	GORSO	2	нет	500	63	0,5	123654	214	3	0,0047
2	2	Изделие Л	REB	REB	3	нет	500	63	0,5	100000	135	1	0,0074
3	3	Блок	REB	REB	3	да	14	2	0,5	889000	296	1	0,0034
4	4	Блок	REB	REB	3	да	12	2	0,5	789000	170	1	0,0059
5	5	И	REB	REB	3	да	8	1	0,5	653000	298	1	0,0034
6	6	Блок	REB	REB	3	да	8	1	0,5	745000	86	1	0,0116
7	7	Блок	RLO	ПрНК	3	да	14	2	0,5	8100000	135	3	0,0074
8	8	А	RNO	РЭО	2	да	8	1	0,5	586957	444	1	0,0023
9	9	ЛС	RLO	ПрНК	3	нет	600	75	0,5	159753	214	9	0,0047
10	10	КБ	RLO	ПрНК	3	да	8	1	0,5	369258	237	4	0,0042
11	11	ЗАПРОСЧИК	RNO	РЭО	4	да	6	1	0,5	200000	187	1	0,0053
12	12	Блок	RSNO	РЭО	2	да	6	1	0,5	854854	173	7	0,0058
13	13	БУ	RNO	РЭО	4	нет	500	63	0,5	200000	135	1	0,0074
14	14	БЛОК Н	RLO	ПрНК	3	нет	600	75	0,5	7500600	139	4	0,0072
15	15	БЛОК	RLO	ПрНК	3	нет	600	75	0,5	4500600	238	5	0,0042
16	16	ИЗДЕЛИЕ С	RLO	ПрНК	3	да	12	2	0,5	400200	155	5	0,0064

Рисунок 2 – Фрагмент файла исходных данных имитационной модели

Модель формирования отказов позволяет на основе имеющейся статистики сформировать поток заявок – отказов. Модель реализована на основе агентного подхода, где количество агентов – соответствует различному типу блоков. Внешний вид агента blok представлен на рисунке 3.

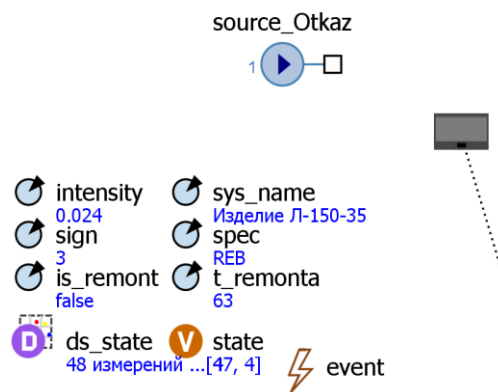


Рисунок 3 – Внешний вид агента blok модели отказов

На рисунке 4 приведен листинг программного кода модели, отвечающего за считывание информации из базы данных и формирование популяции агентов blocks.

```

// Считываем отказы из БД
for (int a = 2 ; excelFile.cellExists(1, a, 1) ; a++)
{
String s1 = excelFile.getCellStringValue(1, a, 1); // наименование блока
String s2 = excelFile.getCellStringValue(1, a, 5); // ремонт в вч???
boolean b2 = false;
if (s2.equals("да")) b2 = true;
int i3 = (int)excelFile.getCellNumericValue(1, a, 4); // определение значимости
String s4 = excelFile.getCellStringValue(1, a, 2); // наименование группы Р и Р
double d5 = excelFile.getCellNumericValue(1, a, 11); // интенсивность отказов
d5 = d5 * 24; // перевели в л/день
d5 = d5 * ((sredn_narabotka_v_god / 24) / 365); // перевели на реальное время
d5 = d5 * kol_vo_bortov / 6; // умножили на кол-во бортов и разделил на количество бортов наблюдаемых за 5 лет
| double d6 = excelFile.getCellNumericValue(1, a, 6); // время ремонта

//Otkaz_type OTK = new Otkaz_type(s1 , b2 , i3 , s4 , d5 ,d6);

if (d5 > 0)
{
add_blokis(d5, s1, i3, s4, b2, d6);
}
}

```

Рисунок 4 – Фрагмент листинга программного кода модели

Таймер event отвечает за генерацию заявок – отказов (методом inject), элемента source_Otkaz). Интенсивность отказов задается в соответствии с описанными выше исходными данными. Блок «source» формирует заявки – отказы и перенаправляет их в частную модель процесса ремонта. В качестве заявки используется «otkaz», расширяющий класс базовой заявки «entity» и обладающий следующим набором параметров:

- «is_rem_in_vch» - логическая переменная, характеризующая возможность устранения отказа в условиях эксплуатирующей организации;

- «Significance» - класс функциональной значимости (отвечает за определение очередности ремонта);

- «specialnost» - наименование специальности, отвечающей за обслуживание и ремонт данного оборудования;

- «t_remonta» - максимально допустимое время ремонта;

- «t_start» - время возникновения отказа;
- «my_blok» - наименование (тип) отказавшего блока.

Частная модель процесса технического обслуживания.

На рисунке 5 приведена процессная диаграмма, описывающая порядок проведения технического обслуживания АТ.

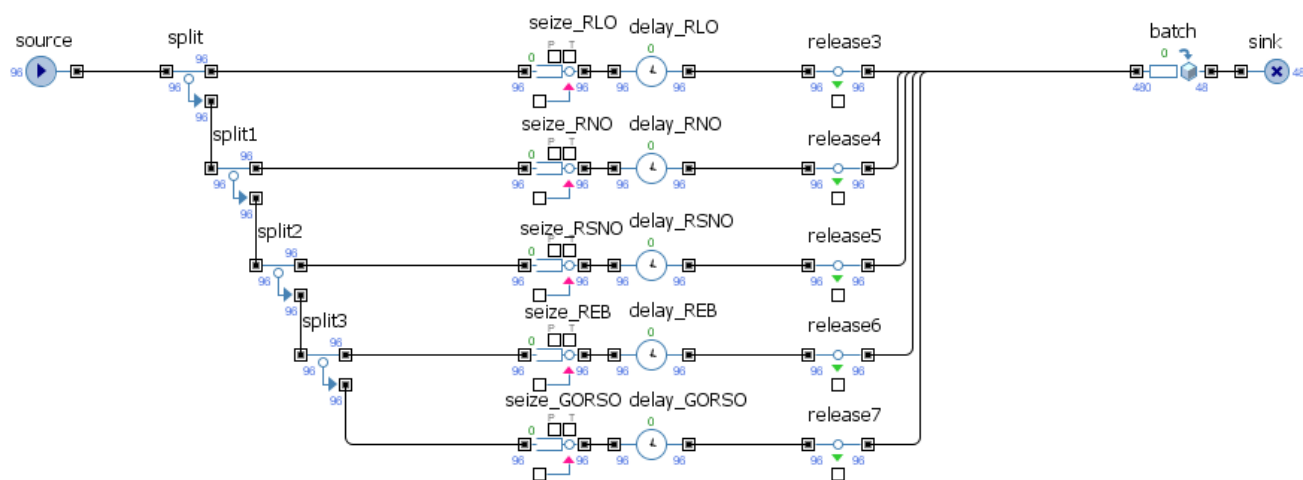


Рисунок 5 – Процессная диаграмма, описывающая порядок проведения технического обслуживания АТ

В качестве источника заявок выступает блок source, который генерирует заявки на проведение ТО в установленные моменты времени, соответствующие регламенту. Далее заявка дублируется (блоки «split») и перенаправляется в пять параллельных ветвей, соответствующих специальностям групп регламента радионавигационного оборудования, радиосвязного оборудования и т.д. Далее осуществляется захват соответствующего ресурса (блоки «seize»), необходимого для выполнения работ по

техническому обслуживанию согласно технической документации. В блоках «delay» осуществляется задержка заявок на время, соответствующее времени проведения работ. Освобождение захваченного ресурса осуществляется в блоках «release». Как только будет выполнен весь перечень работ, в блоке batch происходит объединение пяти заявок в одну и уничтожение, что соответствует полному циклу проведения процесса ТО АТ. Блок «sink» отвечает за сбор статистики выполненных работ.

Частная модель процесса ремонта.

На рисунке 6 приведен фрагмент процессной диаграммы, описывающей ремонт АТ.

Заявки на проведение ремонта поступают в диаграмму из частной модели формирования отказов. Далее в блоке «mesto_remonta» на основании априорной информации о ремонтпригодности в условиях эксплуатирующей организации или в заводских условиях осуществляется выбор места ремонта (ТЭЧ, либо АРЗ). В зависимости от класса функциональной значимости, блок «значимость» распределяет заявки по трем параллельным и структурно идентичным ветвям, где каждая ветвь соответствует различным значениям приоритетности ремонта, на рисунке 6, для примера, приведен фрагмент процессной диаграммы, описывающий процесс ремонта. То есть, поступившие на ремонт заявки-блоки обслуживаются с разным приоритетом (функциональной значимостью).

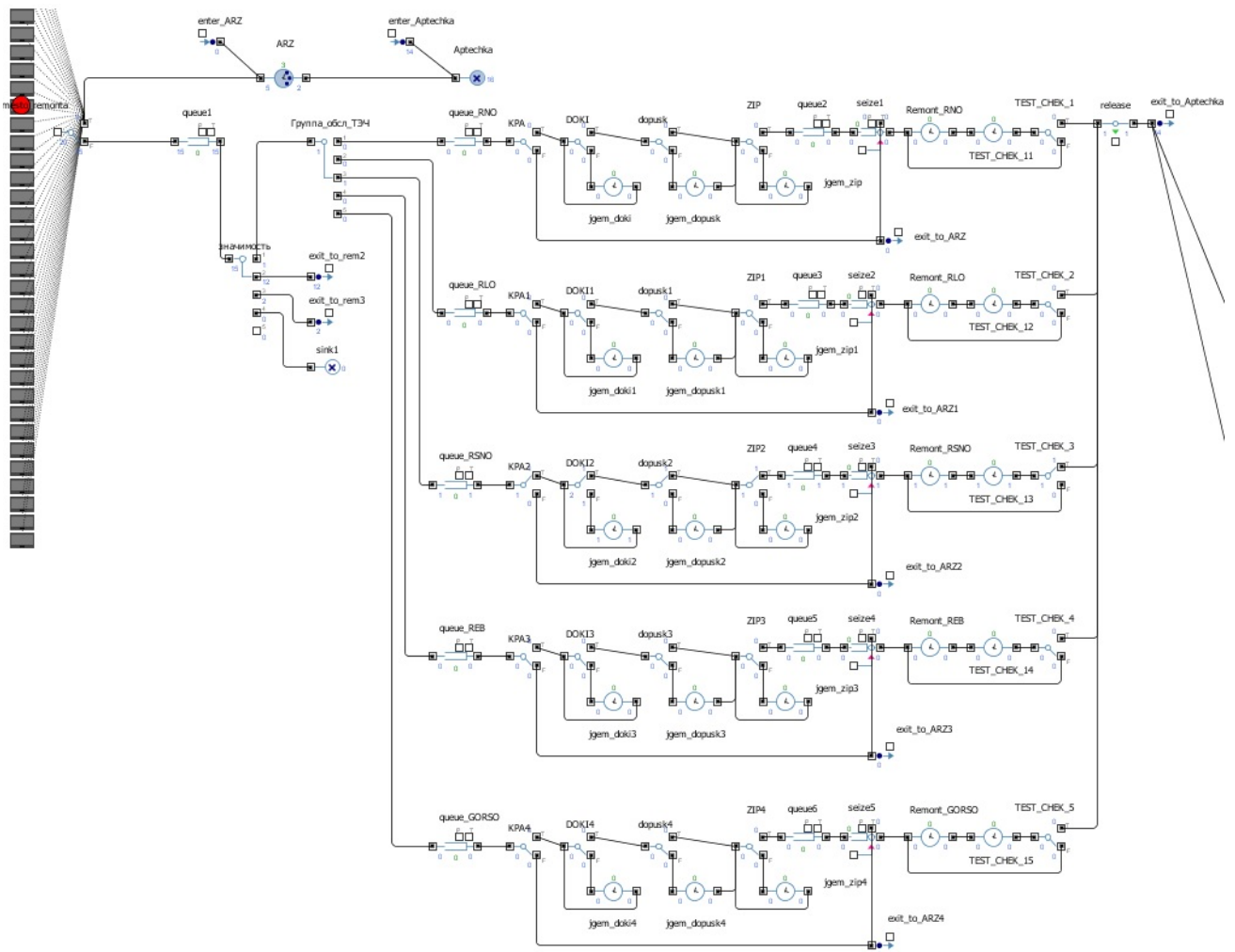


Рисунок 6 – Фрагмент процессной диаграммы, описывающей процесс ремонта

Блок «группа-обсл_ТЭЧ» направляет входящие заявки по пяти ветвям, соответствующим группам обслуживания и ремонта ТЭЧ (специальностям). После этого, для обслуживания заявки, происходит процесс проверки факторов, влияющий на ее выполнение, объект «KPA», «DOKI», «dopusk», «ZIP» направляет заявку в один из выходных портов с заданной вероятностью, в случаях отсутствия «KPA» заявка перенаправляется на обслуживание в блок «ARZ», при отсутствии «DOKI», «dopusk», «ZIP» заявка задерживается на время ожидания, соответствующее руководящей

документации, «seize1» захватывает для данной заявки заданное количество ресурсов определенного типа, в случае когда нет свободных ресурсов нужного типа, а время ожидания на обслуживание заявки превышает пороговое, происходит вытеснение «exit_to_ARZ» и перераспределение заявки в блок «ARZ» через «enter_to_ARZ». После чего блок «Remont_RNO» осуществляет временную задержку продолжительностью, соответствующей трудозатратам на ремонт отказавшего оборудования, а «TEST_CHEK_1» задержку на время необходимое для проверки отремонтированного оборудования, согласно технической документации. В случаях, когда обслуженная заявка, т.е. отремонтированное оборудование, с заданной вероятностью, не проходит проверку встроенными системами контроля или на специализированной КПА, выполняется ее перенаправляется в «Remont_RNO» для повторного комплекса мероприятий по ремонту. После успешно завершенной заявки «release» освобождает занятые ресурсы. Блоки «ARZ», «Aptechka» собирают общую статистику обработанных заявок [7-12].

Модель процесса ТО и Р представлена совокупностью процессных диаграмм, позволяющих описать процессы ТО и Р в целом. Их ключевая взаимосвязь заключается в совместном использовании общих ресурсов – личного состава в соответствии с заданными приоритетами, что позволяет получить описание системы в целом (взаимоувязать процессы ТО и Р).

Частная модель распределения общих ресурсов реализована в виде совокупности наборов ресурсов специалистов, представленная на рисунке 7, а также частично в частной модели процесса ремонта в виде значений приоритетов в

обслуживании [13, 14]. Таким образом, модель позволяет задать требования к очередности проведения работ и соответственно их приоритетности.



Рисунок 7 – Внешний вид программной реализации частной модели распределения общих ресурсов

Результаты моделирования

Для визуализации процесса ТО и Р в режиме реального времени в модели использована временная цветовая диаграмма, представленная на рисунке 8 [7, 14-17]. На оси ординат диаграммы приведены индексы блоков, на оси абсцисс – модельное время, ниже показано цветовое соответствие различных состояний блоков (исправен, ожидает ремонта, осуществляется ремонт в в/ч, и т.д.)

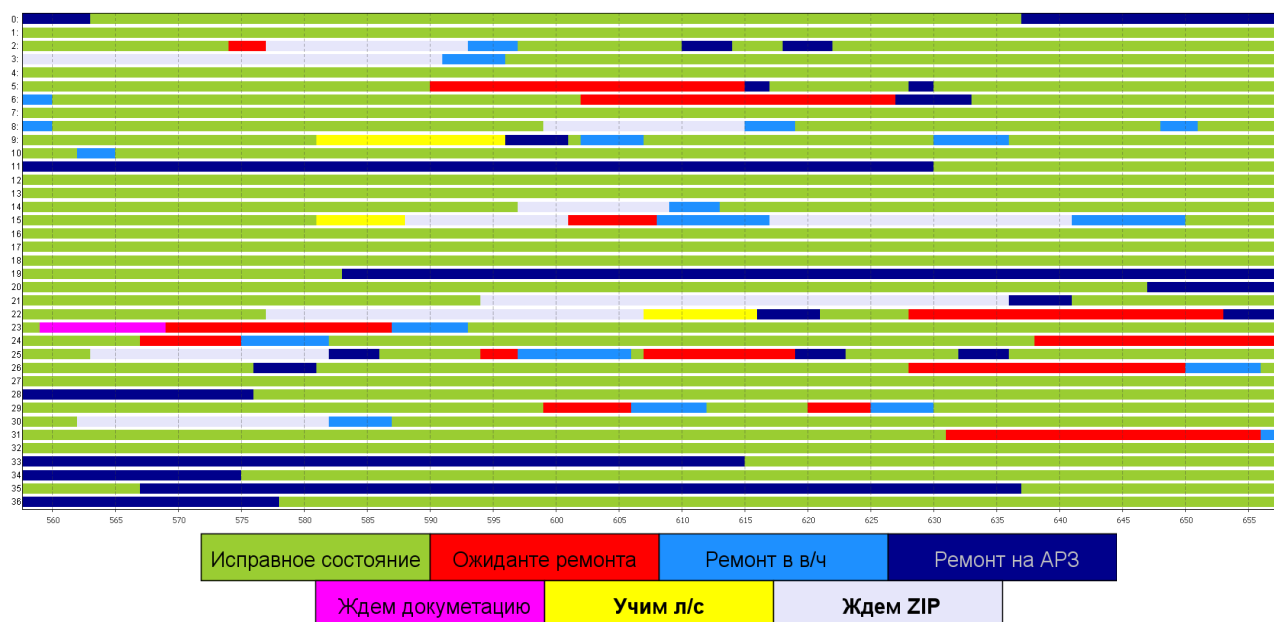


Рисунок 8 – Цветовая временная диаграмма для визуализации процессов ТО и Р

В разработанной модели системы ТО и Р предусмотрено отображение текущего состояния загрузки личного состава ремонтных подразделений в виде временной диаграммы, представленной на рисунке 9, что позволяет в режиме реального времени наблюдать текущую загрузку [13, 14, 18].

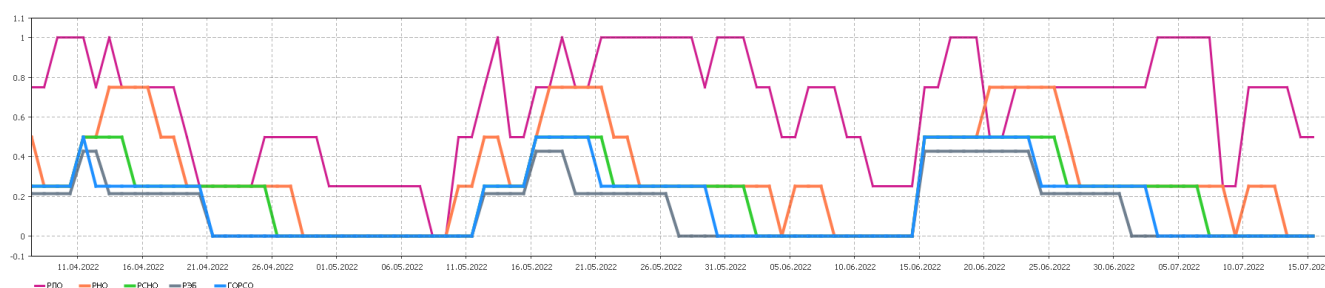


Рисунок 9 – Временная диаграмма занятости личного состава

Для сбора статистики в разработанной имитационной модели используются блоки («statistics_GORSO», «statistics_REB», «statistics_RLO», «statistics_RNO», «statistics_RSNO»), которые обобщают статистическую информацию о занятости личного состава групп регламента и ремонта эксплуатирующей организации. Статистическая информация занятости личного состава представлена усредненными значениями за моделируемый период, в виде столбиковых диаграмм, изображенных на рисунке 10. Сбор данных о загрузке личного состава позволяет получить обобщенные значения для данной структуры системы ТО и Р, что позволит оценить

состояние загрузки в режиме реального времени и в последующем принимать управленческое решение о перераспределении отказавшего оборудования по местам ремонта, в связи с отсутствием свободных ресурсов или большой продолжительности времени ожидания ремонта. Данная информация является научно-обоснованным базисом для принятия решений по формированию нового облика системы ТО и Р.

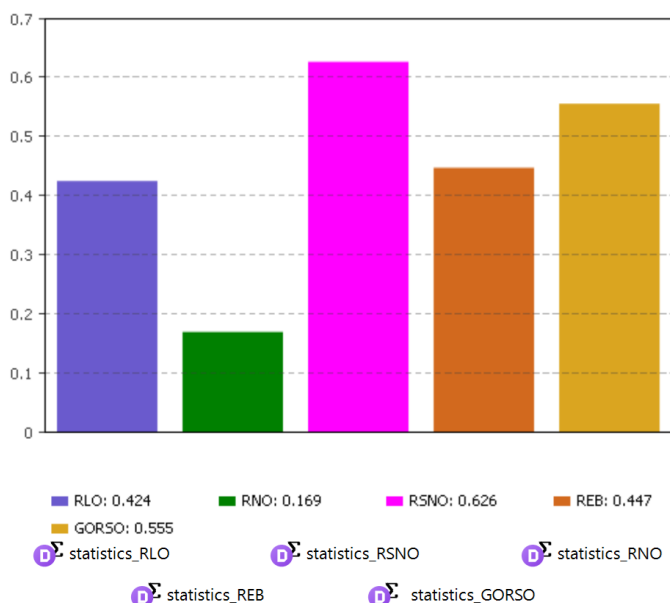


Рисунок 10 – Статистика занятости личного состава

Следует подчеркнуть, что задача, по созданию имитационной модели процесса ТО и Р, относится к классу задач большой размерности и высокой структурной сложности. Вместе с тем, принятая степень детализации позволила рассмотреть разработанную имитационную модель как агрегированный цифровой двойник системы ТО и Р в условиях эксплуатирующей организации, позволяющий проводить исследование такой системы на протяжении всего цикла эксплуатации, с воздействующими на нее факторами. Кроме того, архитектура модели не требует от

оператора навыков работы в среде моделирования: построение модели осуществляется на основе параметрической настройки через интерфейс пользователя и связанную электронную таблицу [7, 16-20]. В заключение следует выделить ряд основных преимуществ принятой методологии моделирования:

1. Имитационная модель позволяет анализировать систему ТО и Р и находить решения в тех случаях, когда такие методы, как аналитические вычисления и все виды программирования (линейное, нелинейное, марковское и т.д.), с решением задачи не справляются.

2. Разработка имитационной модели содержательно гораздо проще, чем аналитической, поскольку процесс создания модели является модульным и нарастающим постепенно по относительно независимым и структурно простым ветвям процесса.

3. Структура имитационной модели не абстрактно, а естественным образом отображает структуру моделируемой системы ТО и Р.

4. Имитационная модель позволяет отслеживать любые объекты и фазы работы системы, добавлять метрики и проводить статистический анализ.

5. Одним из главных преимуществ разработанной имитационной модели является возможность создавать анимацию и проигрывать модель системы во времени, наблюдая за ее поведением. Анимация является неоспоримым преимуществом при отладке (поиске ошибок), демонстрации и верификации модели. Таким образом, имеются все основания утверждать, что принятая методология, основанная на применении передовых технологий много подходного визуализированного имитационного моделирования, способна обеспечить:

– преодоление проблемы большой размерности и высокой структурной сложности моделируемой системы;

– выполнение функции поддержки принятия решений о рациональном выборе места ремонта, по минимизации эксплуатационных расходов.

Смоделированная действующая система ТО и Р АТ позволит в последующем провести анализ, обобщить полученные результаты и применить их при формировании оптимальной численности личного состава ремонтных подразделений, сформировать необходимое количество ЗИП для оперативного ремонта, с целью минимизации простоев АТ.

Список источников

1. ГОСТ 18322 – 2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2011.

2. ГОСТ РВ 0101 – 001 – 2007. Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. - М.: Стандартинформ, 2011.

3. Максимей И.В., Смородин В.С, Демиденко О.М. Разработка имитационных моделей сложных технических систем. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 298 с.

4. 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.

URL: <http://www.академия-ввс.рф/images/docs/vks/16-2020/238-245.pdf>

5. ГОСТ Р 53863-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010.

6. Железняков А.О., Сидорчук В.П. Распределение бортового радиоэлектронного оборудования по функциональной значимости при организации войскового ремонта // Конференция «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (Москва, 25-26 мая 2021): сборник тезисов докладов. - М.: ИД Академии Жуковского, 2021. – 600 с.
7. Боев В.Д. Компьютерное моделирование. – СПб.: Военная Академия Связи, 2014. – 432 с.
8. Железняков А.О., Подрезов С.Н., Сидорчук В.П. Имитационная модель процесса организации и функционирования системы технического обслуживания и ремонта бортового радиоэлектронного оборудования авиационной техники в процессе эксплуатации // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662772 от 04.08.2021.
9. Железняков А.О. Имитационная модель процесса оптимизации численности личного состава для выполнения технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного оборудования авиационной техники в процессе эксплуатации // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202162811 от 05.08.2021.
10. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управления запасами. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
11. Загребяев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем. - М.: МИФИ, 2007. – 332 с.

12. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. (Глава 16. Жадные алгоритмы). - М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.
13. Сидорчук В.П., Железняков А.О., Цуприян В.А. Математическая модель распределения личного состава при выполнении работ на авиационной технике для улучшения качества эксплуатации и безопасности полетов // Проблемы безопасности полетов. 2021. № 10. С. 15-20. DOI: [10.36535/0235-5000-2021-10-3](https://doi.org/10.36535/0235-5000-2021-10-3)
14. 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>
15. Кабанов А.А. Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=35910>
16. Боев В.Д., Кирик Д.И., Сыпченко Р.П. Компьютерное моделирование. – СПб.: Военная Академия Связи, 2011. – 348 с.
17. 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>
18. Поленин В.И., Бондаренко И.В., Бассауэр А.А. Имитационное моделирование жизненного цикла радиоэлектронных систем вооружения кораблей // Труды Первой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения»

(«ИМСВН-2020») (Санкт-Петербург, 25 ноября 2020). - СПб: Изд-во ВА МТО – АО ЦТСС, 2020. С. 211–218.

19. ГОСТ Р 53393-2009. Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения. - М.: Стандартиформ, 2010. – 30 с.

20. Вентцель Е.С. Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. - М.: Высшая школа, 1998. – 354 с.

References

1. *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.

2. *GOST RV 0101 – 001 – 2007. Ekspluatatsiya i remont izdelii voennoi tekhniki* (State Standard *GOST RV 0101 – 001 – 2007. Operation and repair of military products techniques*), Moscow, Standartinform, 2011.

3. Maksimei I.V., Smorodin V.S, Demidenko O.M. *Razrabotka imitatsionnykh modelei slozhnykh tekhnicheskikh system* (Development of simulation models complex technical systems), Gomel', GGU im. F. Skoriny, 2014, 298 p.

4. Stepanov V.P., Safin A.M., Karpenko O.N., Trofimchuk M.V. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2020, no. 16, pp. 238 – 245. URL: <http://www.akademiya-vvs.rf/images/docs/vks/16-2020/238-245.pdf>

5. *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.

6. Zheleznyakov A.O., Sidorchuk V.P. *Konferentsiya «Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva»*: sbornik tezisov dokladov, Moscow, ID Akademii Zhukovskogo, 2021, 600 p.

7. Boev V.D. *Komp'yuternoe modelirovanie* (Computer simulation), Saint Petersburg, Voennaya Akademiya Svyazi, 2014, 432 p.

8. Zheleznyakov A.O., Podrezov S.N., Sidorchuk V.P. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2021662772*, 04.08.2021.

9. Zheleznyakov A.O. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 202162811*, 05.08.2021.

10. Ryzhikov Yu.I. *Teoriya ocheredei i upravleniya zapasami* (Queue theory and inventory management), Saint Petersburg, Piter, 2001, 384 p.

11. Zagrebaev A.M., Kritsyna N.A., Kulyabichev Yu.P., Shumilov Yu.Yu. *Metody matematicheskogo programmirovaniya v zadachakh optimizatsii slozhnykh tekhnicheskikh system* (Methods of mathematical programming in optimization problems of complex technical systems), Moscow, MIFI, 2007, 332 p.

12. Kormen T., Leizerson Ch., Rivest R., Shtain K. *Algoritmy: postroenie i analiz. (Glava 16. Zhadnye algoritmy)* (Algorithms: construction and analysis. (Chapter 16. Greedy algorithms)), Moscow, Vil'yams, 2005, 1296 p.

13. Sidorchuk V.P., Zheleznyakov A.O., Tsupriyan V.A. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2021, no. 10, pp. 15-20. DOI: [10.36535/0235-5000-2021-10-3](https://doi.org/10.36535/0235-5000-2021-10-3)

14. Chepko I.N., Bogomolov D.V., Karpenko O.N. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100823>
15. Kabanov A.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=35910>
16. Boev V.D., Kirik D.I., Sypchenko R.P. *Komp'yuternoe modelirovanie* (Computer simulation), Saint Petersburg, Voennaya Akademiya Svyazi, 2011, 348 p.
17. Badalov A.Yu., Razumov D.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=93491>
18. Polenin V.I., Bondarenko I.V., Bassauer A.A. *Trudy Pervoi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v voennoi sfere «Imitatsionnoe modelirovanie sistem voennogo naznacheniya, deistvii voisk i protsessov ikh obespecheniya» («IMSVN-2020»)*, Saint Petersburg, Izd-vo VA MTO – AO TsTSS, 2020, pp. 211–218.
19. *GOST R 53393-2009. Integrirovannaya logisticheskaya podderzhka. Osnovnye polozheniya* (State Standard R 53393-2009. Integrated logistic support. General principles), Moscow, Standartinform, 2010.
20. Venttsel' E.S. Ovcharov L.A. *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* (Theory of random processes and its engineering applications), Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 354 p.

Статья поступила в редакцию 02.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022; принята к публикации 20.04.2022.

The article was submitted on 02.02.2022; approved after reviewing on 15.02.2022; accepted

for publication on 20.04.2022.