

УДК 347.823.21

DOI 10.51955/2312-1327_2023_3_6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИБОРОВ

*Николай Сергеевич Херсонский,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
кандидат технических наук,
генеральный директор ООО «СОЮЗСЕРТ»,
ул. Викторенко, д. 7, корпус 30
Москва, 125167, Россия
hersn@yandex.ru*

*Людмила Геннадьевна Большедворская,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
доктор технических наук, профессор кафедры БПиЖД
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский б-р, д. 20
Москва, 125493, Россия
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Аннотация. Статья является логическим продолжением серии публикаций, посвященных решению задач, направленных на управление процессом оценки производства несоответствующей продукции посредством применения статистических методов. В данной работе представлены математические модели определения необходимого количества запасных частей для приборов, состоящих из большого числа одинаковых блоков и оценки зависимости числа запасных агрегатов от количества работающих приборов и ремонтных бригад, обслуживающих их. Разработанные математические модели являются универсальными и могут применяться для любых отраслей промышленности: авиационной, атомной, химической и др.

Ключевые слова: математическая модель, системы массового обслуживания, приборы, поток отказов, средняя наработка на один отказ, запасные части, блоки, агрегаты, ремонтная бригада.

DETERMINATION OF THE NECESSARY QUANTITY OF SPARE PARTS TO MAINTAIN THE PERFORMANCE OF DEVICES

*Nikolai S. Khersonsky,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
Candidate of Technical Sciences,
General Director of SOYUZCERT LLC,
7, building 30, Viktorenko St.
Moscow, 125167, Russia
hersn@yandex.ru*

*Ludmila G. Bolshedvorskaya,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of BP&ZhD
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Kronstadtsky boulevard, 20
Moscow, 125493, Russia
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Abstract. The paper is a logical continuation of a series of publications devoted to solving problems aimed at managing the process of assessing the production of non-conforming products through the use of statistical methods. This paper presents mathematical models for determining the required quantity of spare parts for devices consisting of a large number of identical units and assessing the dependence of the quantity of spare units on the number of operating devices and repair teams servicing them. The developed mathematical models are universal and can be used for any industry: aviation, atomic, chemical industry, etc.

Key words: mathematical model, queuing systems, devices, failure rate, mean time to failure, spare parts, units, repair team.

Введение

Более полувека прошло с начала эксплуатации гражданских самолетов. В течение данного времени сменилось несколько поколений воздушных судов, отличающихся конструктивными, эксплуатационными особенностями, а также наличием современных приборов и комплексов авионики (рис. 1).

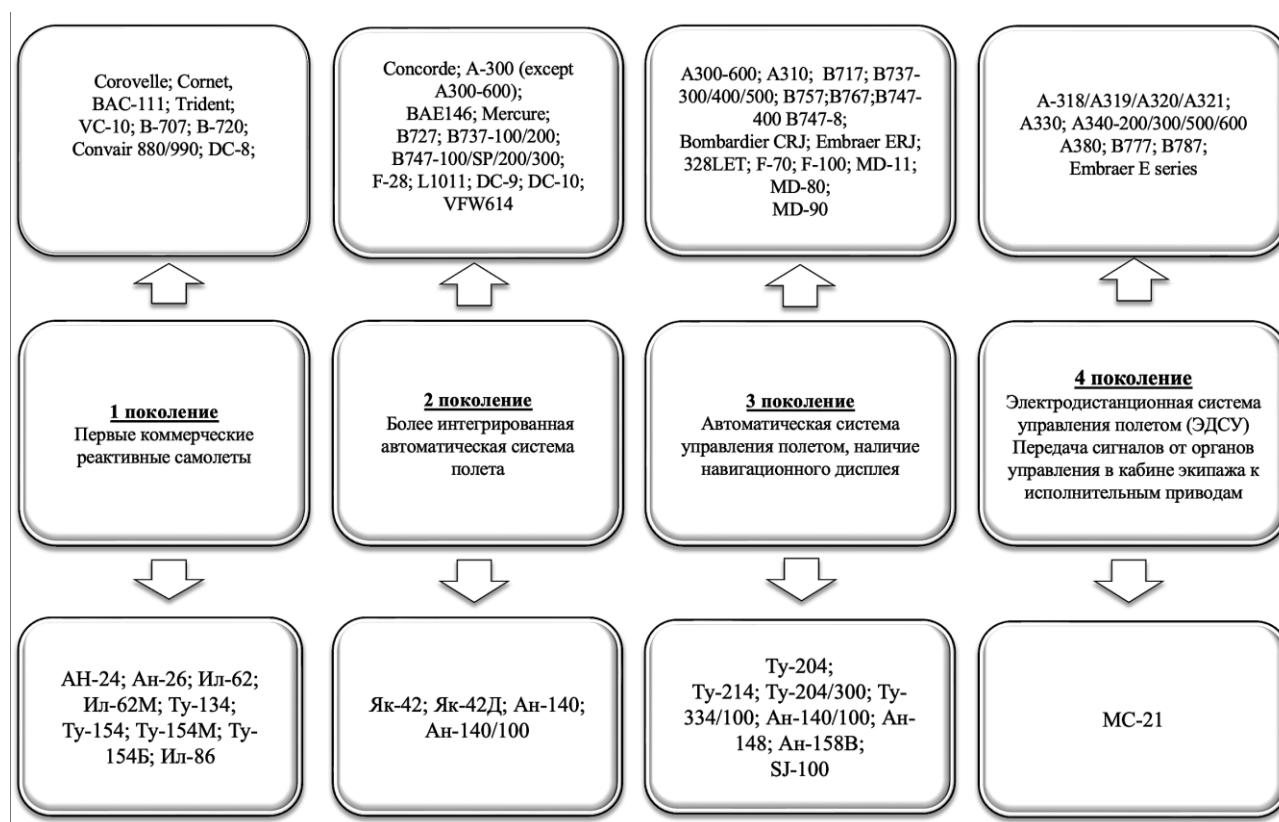


Рисунок 1 – Эволюция развития самолетов гражданской авиации по данным AIRBUS; BOEING; РОСАВИАЦИЯ

В современных воздушных судах только в кабине экипажа располагаются свыше ста приборов и датчиков, влияющих на работоспособность важных систем самолета: 77 датчиков температуры; 6 датчиков давления; 3 датчика положений; 14 точек шин ARINC 429; 2 регистратора силы тока; 3 регистратора напряжения и др.

Отказ или снижение работоспособности одного из приборов могут привести к неблагоприятным последствиям (табл. 1).

Таблица 1 – Примеры последствий отказов приборов в системах воздушных судов

Отказ систем	Последствия
Радиоэлектронное оборудование	Нарушение радиообмена с диспетчерскими службами и радиопеленгаторами по маршруту
Радиосвязное оборудование	Отсутствие связи внутри самолета
Гидравлическая система	Разгерметизация системы
Система управления реверсом тяги	Возникновение несимметричного реверсирования тяги двигателей
Система управления закрылками	Невыпуск и неуборка закрылков
Система управления предкрылками	Самопроизвольный выпуск или уборка предкрылков
Система шасси	Незакрытие створок ниш шасси при уборке
Топливная система	Отсутствие подачи топлива в двигатель
Система электроснабжения	Сокращение располагаемой мощности
Противообледенительная система	Обледенение электрических контактов
Система управления стабилизатором	Заклинивание стабилизатора
Газогенератор силовой установки	Снижение скорости горения топлива
Кислородная система	Отсутствие подачи кислорода
Система автоматического управления самолетом	Отсутствие сигналов изменения высоты и направления полета
Высотомер	Изменение высоты самолета относительно рельефа местности, возникновение сложностей при заходе на посадку
Указатель скорости самолета	Нарушение режима взлета и посадки; выкатывание за пределы взлетно-посадочной полосы
Авиагоризонт	Отклонение от курса маршрута

Представленные примеры последствий отказов в системах самолета подчеркивают роль и значение приборов, функционирующих на основе радиоэлектроники и обеспечивающих автоматическое управление самолетом, поддержание радиообмена с диспетчерскими службами и связь с радиопеленгаторами по маршруту.

Номенклатура и спектр применения приборов не ограничиваются авиатранспортной отраслью и являются весьма разнообразными, начиная от ламп накаливания до сложнейших приборов в автомобилестроении, атомной, оборонной, химической и других отраслях промышленности.

Приборы регулируют различные параметры технологических процессов изготовления продукции, способствуя снижению вероятности появления несоответствующей продукции. От показателей качества и надежности приборов зависят особенности их функционирования в системах массового обслуживания, например, сотовая связь, интернет, навигация, системы управления различных видов вооружения и т.д. [Гнеденко и др., 1966; Саати, 1965; Шор, 1962; Хинчин, 1963].

В век информационных технологий и повсеместной цифровизации проблема надежности электроники охватывает широкий круг отраслей и направлений деятельности, использующих сложную электронную контрольно-измерительную аппаратуру в различных технологических процессах [Гнеденко и др., 1965; Салимова и др., 2018; Шваб, 2016].

В связи с этим задача оценки состояния приборов и формирования резерва запасных частей для оперативного поддержания их работоспособности имеет актуальное значение, особенно для организации работы предприятия, на котором имеется ряд однотипных приборов. Это обусловлено необходимостью оптимизации затрат и создания запасов для обеспечения бесперебойности эксплуатационных и ремонтных процессов.

Материалы и методы

Методическую базу исследования обеспечили результаты современных научных достижений в исследуемой области, рекомендации и методические указания, регламентирующие организацию работ по производству продукции, методы математической статистики, теории вероятности, сравнительного анализа, математического моделирования.

Наиболее ответственной и важной областью деятельности организации, по мнению автора [Бондарева и др., 2015], является моделирование процесса работоспособности оборудования, включающего совокупность и долговечность комплектующих и материалов, из которых оно состоит. Для определения количества деталей, применяемых в эксплуатации изделий, автором подчеркивается важность прочности отдельных узлов и элементов, зависящих от времени эксплуатации. Поэтому необходимо при моделировании износа комплектующих оборудования учитывать интенсивность возникновения отказов при прогнозировании состава и структуры быстроизнашивающихся элементов оборудования.

Заслуживают внимания результаты исследования авторов [Евстифеев и др., 2022], предложивших для организации проведения внеплановых форм обслуживания автомобильной газозаправочной станции метод оптимизации объемов запасных частей, основанный на задаче модели Уилсона. Реализация предложенного метода, по мнению авторов, позволит существенно сократить затраты логистического характера.

Принципы формирования комплекта запасных частей для поддержания технологического оборудования в исправном состоянии представлены в работе [Богдан и др., 2019]. Авторами сформулированы предложения по использованию алгоритма Беллмана, отличающегося простотой и доступностью применения. В

отличие от известных и ранее разработанных методик, данный подход позволяет реализовать одновременно две актуальные стратегические задачи – это формирование комплекта запасных частей и прогнозирование условий для его пополнения с учетом доступности комплектующих изделий.

Для необходимого запаса авиационных запасных частей авторами работы [Климович и др., 2021] предложен подход, выстроенный исходя из гипотезы, что дефицит необходимых комплектующих может привести к невыполнению учебно-боевых задач. И на фоне выявления трех основных причин: выработка технического ресурса; эксплуатационные повреждения и ненадежность комплектующих изделий предложена методика определения необходимого количества агрегатов самолетного оборудования, обеспечивающего повседневную деятельность авиаотряда.

Создание системы технического обслуживания и замены агрегатов и узлов технического оборудования имеет актуальное значение для различных сфер деятельности. Авторами работы [Озерной и др., 2018] подчеркивается, что одним из способов являются определение и учет необходимого количества запасных частей и агрегатов с учетом стоимости закупки, доставки и хранения. Большое значение для решения такой задачи приобретают сокращение времени простоя при отказах и своевременное проведение плановых работ.

В работе, выполненной на базе авиационной компании [Обеспечение стабильной работы..., 2016], предлагается решение задачи обеспечения стабильной работы оборудования осуществить посредством упрощения формальностей при оформлении заявок, обеспечивая тем самым своевременность оперативного обслуживания авиационной техники. Такой подход, с одной стороны, позволит сократить время простоя объектов, но с другой стороны, процесс формирования стратегически необходимых деталей, агрегатов, материалов может усложнить поиск из-за наличия многочисленных наименований и прецедентов изделий.

Таким образом, результаты рассмотренных научных исследований по управлению запасами в различных сферах деятельности акцентированы на прогнозирование и планирование готовых комплектующих изделий, узлов и агрегатов [Аверченкова и др., 2021; Железняков и др., 2022; Расчет экономических характеристик..., 2017]. Практическая применимость этих достижений для решения задачи определения количества запасных частей для поддержания работоспособности приборов весьма ограничена.

Результаты

Как известно, время работы приборов между отказами, время выхода из строя приборов или появление отказов представляют собой случайные величины. Это объясняется различными изменениями условий эксплуатации, процесса работы приборов и т.д. Поток отказов, характеризующиеся свойствами стационарности и ординарности, возникают в зависимости от их сложности, времени и технологии устранения. Под свойствами стационарности понимается последовательность однородных событий, происходящих одно за другим в какие-то моменты времени. Если эти промежутки времени строго

определены, будет иметь место регулярный поток событий, если они случайны, то будет случайный поток событий. Чаще всего рассматривают простейшие (стационарные пуассоновские) случайные потоки.

Состояние ординарности обусловлено тем, что за малый промежуток времени вероятность появления двух и более отказов стремится к нулю, то есть в системе не произойдет более одного отказа. Однако, если все элементы сложных приборов работают одновременно, то их отказы могут приобрести мгновенный характер появления, что усложняет решение подобной задачи.

Поступление сложного прибора новой конструкции в эксплуатацию сопряжено с необходимостью определения количества запасных частей для оперативного обслуживания, устранения возникающих отказов и неисправностей [Херсонский и др., 2013]. Сложность решения этой задачи для гражданской авиации обусловлена санкционными ограничениями, изменениями логистических цепочек и определением необходимого количества средств предприятия на доставку и хранение запасных частей (рис. 2).

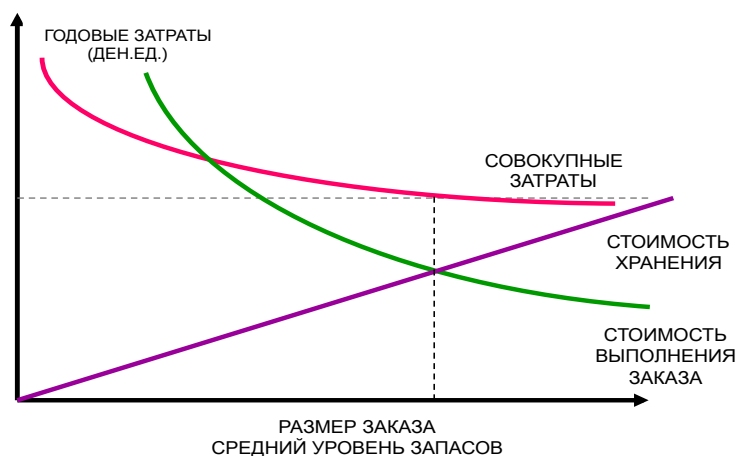


Рисунок 2 – Общий вид управления запасами

Кроме этого, при определении количества запасных частей надо учитывать статистику причин отказов приборов давления в процессе их эксплуатации, компетентность обслуживающего персонала, место и время для восстановления вышедших из строя деталей, узлов, блоков и т.д. [Методика обоснования резерва..., 2019; Херсонский и др., 2013]. В связи с этим в работе были сформулированы две задачи, основу которых составили результаты исследования, представленные в работе [Херсонский и др., 2013]. Суть первой задачи заключается в разработке математической модели определения необходимого количества запасных частей для прибора, состоящего из большого числа одинаковых блоков. Целью второй задачи является разработка математической модели зависимости числа запасных агрегатов от группы работающих приборов, а также количественного состава ремонтных бригад, обслуживающих их.

Для решения поставленных задач проведен теоретический эксперимент, предположив, что прибор давления в самолете состоит из m однотипных блоков. В процессе его работы определенные блоки могут выходить из строя случайным образом. Статистически установлено, что время наработки на отказ может быть распределено по показательному закону с параметром $\lambda = \frac{1}{\bar{t}_n}$ [Методика обоснования резерва..., 2019; Херсонский и др., 2013].

Для замены неисправных блоков имеется n запасных, которые могут быть использованы для ремонта. Блок, который подлежит замене из-за неисправности, может поступить в ремонт. Бригада, выполняющая техническое обслуживание, состоит из c специалистов, компетентность которых позволяет восстанавливать неисправные блоки. Время восстановления каждого блока не регламентировано, поскольку зависит от причины отказа. Предположим, что на ремонт каждого блока в среднем затрачивается время $\bar{t}_{обс}$, а время восстановления распределено по показательному закону с параметром $\mu = \frac{1}{\bar{t}_{обс}}$. Восстановленные блоки могут пополнить объем запасных частей для последующего использования. Задача заключается в оценке возможных состояний блоков, входящих в прибор давления. В работе [Баранович, 2010] было представлено решение подобной задачи, используя для этого алгоритм Эрланга-Колмогорова:

$$\begin{aligned} P'_0(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ P'_k(t) &= -(\lambda + k\mu)P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + (k+1)\mu P_{k+1}(t) \\ &\text{при } 0 < k < c \\ P'_k(t) &= -(\lambda + c\mu)P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + c\mu P_{k+1}(t) \\ &\text{при } c < k < n+1 \\ P'_{n+1}(t) &= -c\mu P_{n+1}(t) + \lambda P_n(t) \end{aligned} \quad (1)$$

где: $P_0(t)$ – вероятность того, что в момент времени t все блоки в приборе давления находятся в исправном состоянии и прибор работает;
 $P_k(t)$ – вероятность того, что в момент времени t имеется k неисправных блоков;
 $P_{n+1}(t)$ – вероятность того, что прибор не может работать из-за отсутствия исправного блока в приборе давления.

Если обозначить $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ и учесть нормирующее условие:

$$\sum_{k=0}^{n+1} P_k(t) = 1, \quad (2)$$

то получим для стационарных условий [Баранович, 2010; Методика обоснования резерва..., 2019; Херсонский и др., 2013] следующие решения:

1. Вероятность того, что k блоков находится в ремонте:

$$P_k = \frac{\alpha^k}{k!} P_0 \quad \text{при } k < c \quad (3)$$

$$P_k = \left(\frac{\alpha}{c}\right)^{k-c} \frac{d^c}{c!} P_0 \quad \text{при } c \leq k < n+1$$

2. Вероятность того, что все n запасных блоков находятся в исправном состоянии:

$$P_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^c \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=1}^{n-c+1} \left(\frac{\alpha}{c}\right)^k \right]^{-1} \quad (4)$$

3. Прибор давления не будет работать в том случае, если $(n + 1)$ блок выйдет из строя. Вероятность этого состояния определяется формулой (4) при $k = n+1$, т.е.:

$$P_{отк} = \frac{\left(\frac{\alpha}{c}\right)^{n-c+1} \frac{\alpha^c}{c!}}{1 + \sum_{k=1}^c \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=1}^{n-c+1} \left(\frac{\alpha}{c}\right)^k} \quad (5)$$

4. Среднее число блоков, находящихся в ремонте при бесперебойной работе прибора давления, определяется соответствием:

$$N_p = \sum_{k=1}^n k P_k \quad (6)$$

5. Количество специалистов, принимающих участие в ремонте:

$$N_z = \sum_{k=1}^c k P_k + c \sum_{k=c+1}^{n+1} P_k \quad (7)$$

6. Среднее число блоков, ожидающих ремонта:

$$N_o = \sum_{k=c+1}^{n+1} (k - c) P_k \quad (8)$$

Решение задачи будет не законченным, если пренебречь экономической оценкой целесообразности предлагаемого подхода, ключевым звеном которой является минимизация затрат при эксплуатации восстановленного прибора давления. Если предположить, что $C_{зан}$ – стоимость запасных блоков. И принять C_{np} – стоимость единицы времени простоя прибора давления; $C_{он}$ – стоимость содержания одного оператора в единицу времени; T_α – среднее время амортизации запасного блока. Тогда оценка затрат может быть определена:

$$C_0 = nC_{зан} + (cC_{он} + C_{np}P_{отк}) T_\alpha \rightarrow \min \quad (9)$$

В зависимости от причины возникновения отказа в системе и факторов, влияющих на снижение работоспособности прибора давления, актуальное

значение приобретает расчет численности ремонтной бригады, обеспечивающей минимум потерь, возникающих из-за простоя прибора давления и затрат на запасные блоки:

$$C_0 = nC_{зан} + C_{пр}P_{отк}) T_{\alpha} \rightarrow \min \quad (10)$$

Иллюстрацию практической применимости предлагаемого подхода рассмотрим на условном примере. Прибор состоит из 500 блоков, каждый из которых обладает надежностью работы, характеризуемой средней наработкой на один отказ, равной 500 час. Время выхода каждого блока из строя случайно. Вышедший из строя блок поступает в ремонт. Время ремонта является случайной величиной и имеет показательное распределение с параметром $\mu=1$. Ремонт производят два оператора. Как только блок выйдет из строя, прибор останавливается и не работает до тех пор, пока не будет устранена неисправность. Для обеспечения бесперебойной работы прибора необходимо иметь запасные блоки при условии, что стоимость одного блока $C_{зан}=100$ ден. ед., стоимость одного часа простоя прибора равна $C_{пр}=0,7$ ден. ед.

Согласно разработанной модели определим плотность потока выхода из строя блоков. Так как время выхода из строя каждого блока имеет показательный закон распределения, то и суммарный поток неисправных блоков будет иметь показательное распределение:

$$\lambda = \sum_{i=1}^K \lambda_i \quad (11)$$

где: K – число блоков;

λ_i – плотность выхода из строя i -го блока.

Учитывая, что средняя плотность λ_i выхода из строя каждого блока одинаковая, получим: $\lambda = K\lambda_i$

Плотность выхода из строя одного блока будет равна $\lambda_i = \frac{1}{500}$, тогда общая средняя плотность $\lambda = \frac{1}{500} \cdot 500 = 1$. Отсюда параметр $\alpha = \lambda \bar{t}_{обс} = 1$. Стоимость затрат в результате эксплуатации прибора определяется по формуле:

$$C_0 = nC_{зан} + C_{пр}P_{отк}T_{\alpha} \quad (12)$$

Примем время амортизации блока $T_{\alpha}=5000$ час. Согласно модели (5), рассчитаем $P_{отк}$ для различного числа запасных блоков n . (табл. 2).

Таблица 2 – Вероятность выхода блока из нормального функционирования для различного числа запасных блоков n

n	2	3	4
$P_{отк}$	0,091	0,043	0,01

Расчет стоимости затрат представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Стоимость затрат при эксплуатации прибора, при формировании различного числа запасных блоков n

n	2	3	4
C_0	518,5	450,5	473,5

Вывод – наилучший вариант по стоимости затрат будет реализовываться для формирования запаса из 3-х запасных блоков.

Для решения второй задачи, направленной на оценку зависимости количества запасных агрегатов от группы работающих приборов и численности бригады ремонтной службы, обслуживающих их, в работе использованы принципы агрегатного способа ремонта.

Для решения задачи использованы выводы, полученные в работе [Херсонский и др., 2013], практическая применимость которых была продемонстрирована позже в работе [Методика обоснования резерва..., 2019].

Предположим, что имеется m однотипных машин. В процессе работы агрегаты, приводящие машины в движение, могут выходить из строя случайным образом с постоянной плотностью λ . Время выхода из строя машины распределено по показательному закону со средним значением $\bar{t}_n$. Для замены вышедших из строя неисправных агрегатов имеется n запасных, которые используются для оперативного восстановления неисправности. Неисправный агрегат поступает в ремонт. Ремонт занят c бригад. Время ремонта агрегата является случайным, так как определяется характером неисправности и сложностью ремонта и может быть принятым средним временем $\bar{t}_{обс}$ [Методика обоснования резерва..., 2019; Херсонский и др., 2013]. При решении задачи в работе учитывались несколько характерных состояний системы:

- все запасные агрегаты исправны и все машины работают;
- k запасных агрегатов ($1 \leq k \leq n$) неисправны и либо ремонтируются все, либо часть ремонтируется, а часть ожидает ремонта;
- n запасных агрегатов неисправны и s машин не работает ($1 \leq s \leq m$) [Методика обоснования резерва..., 2019; Херсонский и др., 2013].

Предложена система уравнений:

$$\begin{aligned}
 P'_0(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\
 P'_k(t) &= -(\lambda + k\mu)P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + (k+1)\mu P_{k+1}(t) \text{ при } 0 < k < c \\
 P'_k(t) &= -(\lambda + c\mu)P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + c\mu P_{k+1}(t) \text{ при } c \leq k \leq n+1 \\
 P'_{n+s}(t) &= -(\lambda + c\mu)P_{n+s}(t) + \lambda P_{n+s-1}(t) + c\mu P_{n+s+1}(t) \text{ при } 1 \leq s < m \\
 P'_{n+m}(t) &= -c\mu P_{n+m}(t) + \lambda P_{n+m-1}(t),
 \end{aligned} \tag{13}$$

где: $P_0(t)$, $P_k(t)$ и $P_{n+s}(t)$ – вероятности состояний агрегатов в момент времени t .

Введя обозначение $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ и с учетом нормирующего условия $\sum_{k=0}^{n+m} P_k(t) = 1$, можно получить решение оценки состояния агрегатов для стационарных условий:

1. Вероятность того, что все агрегаты исправны:

$$P_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^c \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=1}^{n-c+1} \left(\frac{\alpha}{c} \right)^k + \left(\frac{\alpha}{c} \right)^{n-c} \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=2}^m \left(\frac{\alpha}{c} \right)^k \right]^{-1} \quad (14)$$

2. Вероятность того, что вышло из строя k агрегатов:

$$\begin{aligned} P_k &= \frac{\alpha^k}{k!} P_0 \quad \text{при } k \leq c \\ P_k &= \left(\frac{\alpha}{c} \right)^{k-c} \frac{\alpha^c}{c!} P_0 \quad \text{при } c \leq k \leq n+1 \\ P_k &= \left(\frac{\alpha}{c} \right)^{k-c} \frac{\alpha^c}{c!} P_0 \quad \text{при } n+1 < k \leq m+n \end{aligned} \quad (15)$$

3. Среднее число неисправных машин, ожидающих ремонта:

$$N_0 = \sum_{n=1}^m k P_{k+n} \quad (16)$$

4. Среднее число неисправных агрегатов [Методика обоснования резерва..., 2019; Херсонский и др., 2013]:

$$N_p = \sum_{k=1}^{m+u} k P_k \quad (17)$$

5. Среднее число ремонтируемых агрегатов:

$$N_3 = \sum_{k=1}^c k P_k + c \sum_{k=1}^m P_{n+k} \quad (18)$$

Для расчета и анализа полученного результата при использовании предлагаемой модели в работе рассмотрен условный пример, когда для повышения производительности труда на производстве устанавливается автоматизированная система управления процессами, состоящая из четырех звеньев ($m = 4$). Каждое звено имеет автономную ЭВМ, аккумулирующую актуальную информацию. Питание ЭВМ производится от отдельных агрегатов питания, которые в процессе работы могут выходить из строя. Среднее время наработки на один отказ агрегата питания примем равным 100 час. Условно ремонт будет производиться ремонтной бригадой ($c = 1$). Среднее время восстановления одного неисправного агрегата питания $t_{\text{ооc}} = 10$ час. Для устранения неисправности вышедшего из строя агрегата питания имеется запас, состоящий из двух агрегатов питания ($n = 2$). Простой ЭВМ из-за технической неисправности может существенно повлиять на производительность труда. Если

предположить, что изменение производительности труда пропорционально числу работающих ЭВМ, тогда ее оценку можно получить из зависимости:

$$\Delta\Pi = \frac{m - N_0}{m} \cdot 100 \quad (19)$$

где N_0 – среднее число ЭВМ, простаивающих из-за того, что нет запасных исправных агрегатов питания;

m – число ЭВМ.

Для решения поставленной задачи необходимо определить P_3 , P_4 , P_5 и P_6 (15) и, используя модель (16), величину N_0 .

Средняя плотность потока неисправностей равна:

$$\lambda = 4 \frac{1}{100} = 0,04, \text{ тогда } \alpha = 0,04 \cdot 10 = 0,4.$$

По формуле (14) определим:

$$P_0 = \frac{1}{1 + 0,4 + 0,4(0,4 + 0,16) + 0,4 \cdot 0,4(0,16 + 0,064 + 0,0256)} \approx 0,6$$

Вероятности P_3 , P_4 , P_5 и P_6 равны:

$$P_3 = 0,16 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \approx 0,038$$

$$P_4 = (0,4)^3 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \approx 0,015$$

$$P_5 = (0,4)^4 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \approx 0,006$$

$$P_6 = (0,4)^5 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \approx 0,0025$$

Отсюда среднее число ЭВМ, простаивающих из-за выхода из строя агрегата питания, равно:

$$N_0 = 1 \cdot P_3 + 2 \cdot P_4 + 3 \cdot P_5 + 4 \cdot P_6 \approx 0,096.$$

Тогда процент повышения производительности труда равен:

$$\Delta\Pi = \frac{4 - 0,096}{4} \cdot 100\% = 97,6\%.$$

Таким образом, расчеты показали возможное снижение производительности труда из-за отказов ЭВМ на 2,4%. Развивая дальнейшую логику применимости предлагаемой модели, возникает задача оценки производительности труда ремонтной бригады при отсутствии запасных агрегатов питания для ЭВМ. Предположим, что на каждый агрегат питания поступает поток неисправностей с плотностью

$$\lambda_0 = \frac{1}{100} = 0,01.$$

Время восстановления $\bar{t}_{обс} = 10$ час. Вероятность выхода каждой ЭВМ из строя из-за неисправности агрегата питания можно определить по формуле Эрланга [Хинчин, 1963], где параметр α_0 равен: $\alpha_0 = \lambda_0 \bar{t}_{обс} = 0,01 \cdot 10 = 0,1$.

$$\text{Тогда } P_{отк} = \frac{0,1}{1+0,1} \approx 0,09.$$

Отсюда среднее число ЭВМ, простаивающих из-за выхода из строя агрегатов питания, равно:

$$N_0 = 4P_{отк} = 4 \cdot 0,09 = 0,36.$$

Процент повышения производительности труда в этом случае будет равен:

$$\Delta\Pi = \frac{4 - 0,36}{4} \cdot 100\% \approx 91\%.$$

Таким образом, видно, что производительность труда в этом случае будет на 6,6% ниже, чем для случая, когда для замены вышедших из строя неисправных агрегатов питания имеется 2 запасных агрегата питания, численность бригады увеличится до четырех человек [Методика обоснования резерва..., 2019; Херсонский и др., 2013]. Владея информацией о стоимости запасных агрегатов питания, затрат на содержание ремонтных бригад, дохода от увеличения производительности труда, можно гарантировать принятие объективного выбора в пользу наиболее целесообразного варианта.

Выводы

1. Проведенное исследование и полученные результаты подтверждают, что цель достигнута, задачи для ее достижения решены в полном объеме.
2. Несмотря на значительное количество публикаций и результатов научных исследований, проблемы определения необходимого количества запасных частей для поддержания работоспособности приборов остаются недостаточно изученными.
3. Существующие методы выбора и оценки стратегических запасов запасных частей имеют недостатки, одним из которых является снижение их применимости в оценке количества запасных частей с учетом производительности труда по устранению их неисправности.
4. Проведенный эксперимент и полученные результаты дают основание предположить о возможности применения предложенных подходов в различных сферах деятельности и производства продукции посредством использования:
 - математической модели определения необходимого количества запасных частей для прибора, состоящего из большого числа одинаковых блоков;
 - математической модели зависимости числа запасных агрегатов от группы работающих приборов, а также количества ремонтных бригад, обслуживающих их.
5. Рассмотрение практического использования математических моделей на конкретных примерах подчеркивает их универсальность и применимость для любых отраслей промышленности.

Библиографический список

- Аверченкова Е. Э. Методика формирования оптимальной совокупности запасного оборудования в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера / Е. Э. Аверченкова, А. А. Шабанов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25 № 4. С. 201-219. DOI 10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219. EDN WFCBKZ
- Баранович И. С. Определение оптимального резерва ненадежных блоков для парка вычислительных машин ВКГТУ // Вестник ВКГТУ. Математика и физика. 2010. № 1. С. 180-186.
- Богдан А. Н. Методика формирования и пополнения комплекта запасных частей технологического оборудования ракетно-космических комплексов с учетом доступности покупных комплектующих изделий / А. Н. Богдан, А. П. Поляков, А. Ю. Чернобаев // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 5. С. 15-19. EDN KAWRRY.
- Бондарева Г. И. Моделирование процесса пригодности рабочих органов технологического оборудования машин природообустройства / Г. И. Бондарева, А. В. Пегушин // Символ науки: международный научный журнал. 2015. № 10-2. С. 93-98. EDN UNUMDB.
- Гнеденко Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. М.: Наука, 1966. 53 с.
- Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. М.: Наука, 1965. 524 с.
- Евстифеев А. А. Оптимизация объемов запасных частей и деталей для автомобильных криогенных газозаправочных станций, работающих в различных климатических условиях / А. А. Евстифеев, И. Ф. Никорук // Актуальные проблемы менеджмента в России и за рубежом: сборник научных трудов межвузовского круглого стола, Москва, 30 апреля 2022 года. Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 101-109. EDN JTHSWH.
- Железняков А. О. Имитационная модель системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного оборудования / А. О. Железняков, В. П. Сидорчук, С. Н. Подрезов // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI 10.34759/trd-2022-123-26. EDN FSYGTG.
- Климович А. В. Расчет необходимого количества авиадвигателей, агрегатов самолетного оборудования, необходимого для обеспечения повседневной деятельности авиационной части / А. В. Климович, Р. В. Соснов // Актуальные проблемы вооруженной борьбы в воздушно-космической сфере : Сборник материалов по итогам VII всероссийской военно-научной конференции, Воронеж, 24–26 февраля 2021 года. – Воронеж: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, 2021. С. 14-16. EDN QSCNKJ.
- Методика обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации / Н. В. Каменецкая, О. М. Медведева, С. Б. Хитов, М. В. Сильников // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28 № 3. С. 6-13. DOI 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13. EDN KBJHYZ.
- Обеспечение стабильной работы оборудования в авиационной компании / В. В. Тарабанова, Е. А. Синева, А. Н. Андреевская [и др.] // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2016. № 3(28). С. 92-98. EDN WKUTTJ.
- Озерной Н. А. Логистический подход к оптимизации распределения запасных частей и агрегатов технических систем по уровням их хранения / Н. А. Озерной, В. В. Дронов, А. В. Крымов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 1(56). С. 180-187. DOI 10.17238/issn2071-2243.2018.1.180. EDN UTSNTK.
- Расчет экономических характеристик при планировании количества запасного оборудования в электросетевой компании / А. В. Ланин, С. В. Сукьясов, И. В. Наумов, С. В. Подъячих // Climate, ecology, agriculture of Eurasia : Materials of the international scientific-practical

conference, Ulaanbaatar, 30–31 мая 2017 года. Ulaanbaatar: Mongolian University of Life Science, 2017. С. 126-134. EDN ZNWGQH.

Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: «Советское радио», 1965. 520 с.

Салимова Т. А. Менеджмент качества в условиях перехода к Индустрии 4.0 / Т. А. Салимова, Н. Ш. Ватолкина // Стандарты и качество. 2018. № 6. С. 58-62. EDN ХОТКDJ.

Херсонский Н. С. Методы сбора и обработки первичной информации о надежности функционирования изделий. Статистические модели отказов функционирования элементов сложных производственных систем / Н. С. Херсонский, В. В. Прошин. М.: ЭкоПресс, 2013. 168 с.

Хинчин А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1963. 236 с.

Шваб К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. «Эксмо», 2016. 138 с. (Top Business Awards) ISBN 978-5-699-90556-0.

Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: «Советское радио», 1962. 553 с.

References

Averchenkova E. E., Shabanov A. A. (2021). The method of forming the optimal set of spare equipment in the organizational and technological system for providing mechanical assembly at the enterprises of the automotive cluster. *Proceedings of the South-Western State University*. 25(4): 201-219. (In Russian)

Baranovich I. S. (2010). Determination of the optimal reserve of unreliable blocks for the fleet of computers of the EKSTU. *Bulletin of the EKSTU. Mathematics and physics*. 1: 180-186. (In Russian)

Bogdan A. N., Polyakov A. P., Chernobaev A. Yu. (2019). The method of formation and replenishment of a set of spare parts for technological equipment of rocket and space complexes, taking into account the availability of purchased components. *Modern high-tech technologies*. 5: 15-19. (In Russian)

Bondareva G. I., Pegushin A. V. (2015). Modeling of the process of suitability of working bodies of technological equipment of environmental engineering machines. *International scientific journal "Symbol of Science"*. 10-2: 93-98. (In Russian)

Evstifeev A. A., Nikoruk I. F. (2022). Optimization of the volume of spare parts and parts for automobile cryogenic gas filling stations operating in various climatic conditions. *In the collection: Actual problems of management in Russia and abroad. Collection of scientific works of the interuniversity round table*. Moscow. 101-109. (In Russian)

Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solovyov A. D. (1965). Mathematical methods in reliability theory. Moscow: Nauka, 1965. 524 p. (In Russian)

Gnedenko B. V., Kovalenko I. N. (1966). Introduction to the theory of queuing. Moscow: Nauka, 1966. 53 p. (In Russian)

Kamenetskaya N. V., Medvedev O. M., Hitov S. B., Silnikov M. V. (2019). The methodology for substantiating the reserve of spare parts for the operation of special equipment during the liquidation of an emergency. *Fire and explosion safety*. 28(3): 6-13. (In Russian)

Khersonsky N. S., Proshin V. V. (2013). Methods for collecting and processing primary information about the reliability of the functioning of products. Statistical models of failures in the functioning of elements of complex production systems. Moscow: EcoPress, 2013. 168 p. (In Russian)

Khinchin A. Ya. (1963). Works on the mathematical theory of queuing. Moscow: FIZMATGIZ. 1963. 236 p. (In Russian)

Klimovich A. V., Sosnov R. V. (2021). Calculation of the required number of aircraft engines, aircraft equipment units necessary to ensure the daily activities of the aviation unit. *Actual problems of armed struggle in the aerospace sphere*. 14-16. (In Russian)

Lanin A. V., Sukyasov S. V., Naumov I. V., Podyachikh S. V. (2017). Calculation of economic characteristics when planning the number of spare equipment in an electric grid company. *Climate, ecology, agriculture of Eurasia* : Materials of the international scientific-practical conference,

Ulaanbaatar, May, 30–31, 2017. Ulaanbaatar: Mongolian University of Life Science. 126-134. (In Russian)

Ozernoy N. A., Dronov V. V., Krymov A. V. (2018). Logistic approach to optimizing the distribution of spare parts and assemblies of technical systems according to the levels of their storage. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 1(56): 180-187. (In Russian)

Saaty T. L. Elements of the theory of queuing and its applications. Moscow: *Soviet radio*, 1965. 520 p. (In Russian)

Salimova T. A., Vatulkina N. Sh. (2018). Quality management in the context of transition to Industry 4.0. *Standards and quality*. 6: 58-62. (In Russian)

Schwab K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. *Eksmo*, 2016. 138 p. (Top Business Awards) ISBN 978-5-699-90556-0. (In Russian)

Shor Ya. B. (1962). Statistical methods of analysis and quality control and reliability. Moscow: *Soviet radio*, 1962. 553 p. (In Russian)

Tarabanova V. V., Sineva E. A., Andreevskaya A. N., Tarabanov I. M., Vishniak S. N. (2016). Ensuring the stable operation of equipment in an aviation company. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 3(28): 92-98. (In Russian)

Zheleznyakov A. O., Sidorchuk V. P., Podrezov S. N. (2022). Simulation model of the system of maintenance and repair of radio-electronic equipment. *Proceedings of the MAI*. 123. DOI 10.34759/trd-2022-123-26. (In Russian)