

На правах рукописи

Сидельников Иван Дмитриевич

**Разработка комплекса экономико-математических моделей управления
многономенклатурным запасом для машиностроительной продукции**

08.00.13 — Математические и инструментальные методы экономики

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата экономических наук



Москва — 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Бром Алла Ефимовна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Косоруков Олег Анатольевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
профессор факультета Высшей школы управления и инноваций.

Сычёв Василий Анатольевич
доктор экономических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»,
профессор кафедры производственного и инновационного менеджмента.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова».

Защита состоится 13 декабря 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.23 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.7, ауд. 414МТ.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.э.н.



Горлачева Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Материально техническое обеспечение (МТО) играет важную роль в обеспечении эксплуатации технических изделий, являющихся продукцией отраслей машиностроительного комплекса. По этой причине в системах МТО аккумулируются большие, часто сверхизбыточные объемы запасных частей (ЗЧ), так как в процессе эксплуатации изделий может возникнуть необходимость замены неисправных элементов. Колоссальные объемы средств, вкладываемых в запасы большой номенклатуры ЗЧ, придают проблеме научного управления запасами МТО на этапе эксплуатации первостепенную важность.

Из всех областей исследования операций теория управления запасами (ТУЗ) имеет одни из самых больших возможностей для практического применения. Необходимость разработки оптимизационных экономико-математических моделей управления запасами обуславливается высокой ценой ошибочных управленческих решений и дестабилизирующим влиянием избыточных запасов в современной экономике. Большое количество научных работ по управлению запасами содержат широкий спектр экономико-математических моделей (ЭММ) для различных отраслей и видов продукции. Во многих моделях в качестве критерия оптимальности используется минимизация затрат на формирование и управление запасом, а система ограничений связана с параметрами складов и транспортных потоков. Но для изделий специального назначения (военная, специальная и спасательная техника) критерием оптимальности при формировании запаса должна являться надежность изделий при эксплуатации в рамках заданного бюджета на МТО. Таким образом, требуется учитывать различные постановки задач, зависящие от вида эксплуатируемой продукции.

Безусловно, что чем больше факторов, влияющих на будущий спрос, будет учтено при моделировании, тем выше будет точность оптимизационных расчетов. Но в ситуации, когда МТО направлено на обеспечение эксплуатации сложной техники, на спрос большое влияние оказывают факторы, связанные с особенностями конструкции и эксплуатации изделий, такие, как структурная избыточность, реализуемая путем резервирования элементов конструкции, уровень унификации, стратегии и режимы эксплуатации.

Существующие экономико-математические модели ТУЗ плохо применимы для формирования запаса МТО для сложных технических изделий на этапе эксплуатации, поскольку не учитывают факторы, характерные для них. Более того, в ЭММ практически не учитываются возможные погрешности расчетов, хотя на практике это приводит либо к дефициту, либо к формированию избыточного запаса. При оценке погрешности расчетов, в случае, если величина погрешности превышает допустимый уровень, необходимо перейти от непрерывного распределения аргумента к дискретному, что значительно повысит точность расчетов, а в результате и экономическую эффективность МТО за счет снижения избыточных запасов. Но во многих моделях не учитывается, что аргумент может иметь как непрерывное, так и дискретное распределение.

Таким образом, оптимальное управление запасами является важной экономической задачей, требующей дальнейшего развития аппарата экономико-математического моделирования ТУЗ, так как возросла сложность решаемых задач в связи с техническим прогрессом в конкретных видах экономической деятельности. Решение вышеозначенной задачи очень значимо для повышения эффективности МТО на этапе эксплуатации машиностроительной продукции и деятельности предприятий в целом.

Степень разработанности проблемы. В современных научных трудах отечественных ученых имеются теоретические и методологические разработки, охватывающие важные аспекты исследуемой области. В области математического моделирования запасов: Орлов А.И., Бром А.Е., Хоботов Е.Н., Рыжиков Ю.В., Черкасов Г.Н., Гаджинский А.М., Гераськин М.И., Сакович В.А., Лукинский В.В., Степанова А.С., Буточнов А.Н.. С точки зрения эффективного управления МТО: Колобов А.А., Омельченко И.Н., Бережной В.И., Зайцев Е.И., Пославский О.Ф., Бадочкин О.В., Бочкарев А.А., Лукинский В.С., Бочкарев П.А., Аникин Б.А., Степанов В.И.

Цель работы: Разработать комплекс экономико-математических моделей управления многономенклатурным запасом с учетом специфики конструкции и эксплуатации изделий, обеспечивающий эффективность материально-технического обеспечения для машиностроительной продукции.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании необходимо решить **следующие задачи:**

1. Анализ существующих экономико-математических моделей управления запасом в системах материально-технического обеспечения.
2. Исследование и систематизация логистических факторов, определяющих специфику конструкции и эксплуатации машиностроительной продукции.
3. Обоснование подхода к учету резервирования элементов конструкции изделий в многономенклатурных задачах оптимизации запаса в системах МТО.
4. Разработка комплекса экономико-математических моделей оптимизации многономенклатурного запаса для случаев дискретного и непрерывного распределения аргумента с учетом различных критериев эффективности МТО.
5. Разработка вычислительного алгоритма и информационного обеспечения для внедрения разработанного комплекса ЭММ.
6. Оценка эффективности разработанного комплекса моделей управления многономенклатурным запасом при разных подходах к МТО машиностроительных изделий.

Научная новизна.

1. Впервые предложен и обоснован учет в экономико-математических моделях логистических факторов, характеризующих специфику конструкции и эксплуатации машиностроительной продукции.
2. Сформулирована задача оптимизации запаса запасных частей в двух постановках в зависимости от вида продукции:

- для гражданской техники коммерческого назначения критерием оптимальности является минимизация совокупных затрат МТО на создание запаса запасных частей;

- для техники военного и специального назначения критерием оптимальности МТО является максимизация надежности (безотказности) изделия.

3. Разработаны экономико-математические модели оптимизации многономенклатурного запаса для дискретного и непрерывного аргументов; выбор вида функции зависит от допустимой величины погрешности оптимизационных расчетов при управлении запасами;

4. Впервые в оптимизационных экономико-математических моделях при определении величины запаса учтена структурная избыточность, присущая сложной технической продукции. Разработанные ЭММ позволяют задать условие сохранения работоспособности изделия при определении потребности в запасных элементах.

Объект исследования: система материально-технического обеспечения машиностроительной продукции на этапе эксплуатации.

Предмет исследования: экономико-математические модели управления запасами, необходимыми для организации эксплуатации машиностроительной продукции.

Область исследования. Основные научные положения диссертации соответствуют следующим пунктам паспорта ВАК Минобрнауки РФ по специальности 08.00.13 «Математические и инструментальные методы экономики»:

1.4. Разработка и исследование моделей и математических методов анализа микроэкономических процессов и систем: отраслей народного хозяйства, фирм и предприятий, домашних хозяйств, рынков, механизмов формирования спроса и потребления, способов количественной оценки предпринимательских рисков и обоснования инвестиционных решений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанный в диссертационном исследовании комплекс экономико-математических моделей позволит предприятиям эффективно управлять запасами, учитывая логистические факторы, отражающие специфику конструкции и процессов эксплуатации изделия, снижая затраты на формирование и управление запасом. Использование разработанных моделей позволит осуществлять материально-техническое обеспечение на предприятиях, учитывая назначение изделий и в соответствии со стратегией эксплуатации по техническому ресурсу. Назначение машиностроительной продукции обуславливает критерий эффективности при оптимизации объема запасных частей, а стратегия эксплуатации по техническому ресурсу задает вероятность отказа элементов, входящих в структуру изделия.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались фундаментальные труды в следующих научных областях: экономико-математическое моделирование, теория управления запасами,

прикладные методы моделирования, теория вероятности, теория надежности, промышленная логистика.

В работе использовались открытые материалы, опубликованные в общей, специальной литературе, в периодической печати, интернет-изданиях, собственные материалы автора, полученные в процессе работы над диссертацией.

Научная задача: Разработать комплекс экономико-математических моделей эффективного управления запасами с учетом конструкционной и эксплуатационной специфики машиностроительной продукции, а также различных критериев эффективности в зависимости от целей эксплуатации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выделенные и систематизированные на основе анализа конструкционной и эксплуатационной специфики логистические факторы, оказывающие влияние на затраты в системе МТО. К конструкционной специфике машиностроительной продукции отнесены: стандартизация/унификация/агрегатирование элементов конструкции изделия; наличие систем диагностики и мониторинга состояния технического ресурса изделий. К эксплуатационным особенностям отнесены: требования к специальности обслуживающего персонала и его квалификации; требования к упаковке и транспортировке.

2. Обоснование критериев эффективности и формализация моделей определения оптимального запаса для машиностроительной продукции различного назначения:

– Для машиностроительной продукции промышленного назначения критерием эффективности является минимум затрат на эксплуатацию, при обеспечении требуемого уровня надежности:

$$\begin{aligned} Z_0 &\rightarrow \min \\ P_0 &\geq P_{\text{задан}}, \end{aligned}$$

где Z_0 – затраты, связанные с формированием запаса.

где P_0 – вероятность безотказной работы системы при найденном объеме запаса;

$P_{\text{задан}}$ – требуемая условиями эксплуатации вероятность безотказной работы системы «изделие + запас на складе».

– Для машиностроительной продукции специального назначения критерием эффективности является максимальная вероятность безотказной работы в рамках планового бюджета на предприятии на формирование запасов:

$$\begin{aligned} P_0 &\rightarrow \max \\ Z_0 &\leq Z_{\text{план}}, \end{aligned}$$

где $Z_{\text{план}}$ – плановый бюджет на формирование запасов.

3. Комплекс экономико-математических моделей определения оптимальных объемов запасов с учетом эксплуатационной и конструкционной специфики изделий машиностроения, включающий исследование моделей для различного состава парка конечных изделий и используемых стратегиях эксплуатации на предприятии.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованными математическими методами, теорией надежности, основывается на положениях, сформулированных в исследованиях отечественных и зарубежных специалистов.

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференции «Стратегическое планирование и развитие предприятий», Москва, ЦЭМИ РАН, 11-12 апреля 2017 года; на конференции «Будущее машиностроения России», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 25-28 сентября 2017 года; на конференции «Эффективность организации и управления промышленными предприятиями: проблемы и пути решения», Воронеж, ВГТУ, 14-15 ноября 2017 года; на заседаниях кафедры промышленной логистики МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, 2017 и 2018г.г.; на научном семинаре Лаборатории экономико-математических методов в контроллинге в 2018 году.

Результаты диссертационного исследования внедрены на АО «Московский вертолетный завод имени М.Л. Миля» и ООО НПО «Кварто». Реализация результатов диссертационного работы подтверждены соответствующими актами внедрения.

Публикации. Основное положение работ отражено в 10 научных работах, общим объемом автора 3,45 п.л., из них в журналах, рекомендованных ВАК РФ – 7.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов и заключения, списка литературы из 156 наименований, а также приложения. Диссертация содержит 140 страниц основного текста, 22 рисунка, 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, поставлены цели и задачи исследования, сформулированы практическая ценность результатов работы, научная новизна и выделены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** проведен анализ существующих экономико-математических моделей ТУЗ для определения объемов запасов в системах материально-технического обеспечения предприятий и компаний, эксплуатирующих машиностроительную продукцию. В результате анализа были выявлены основные недостатки:

– Во многих ЭММ в качестве критерия оптимальности выступает минимизация затрат на формирование и управление запасом. Но при этом не отражается сущность спроса на запасные части, порождаемая отказами элементов. Таким образом, для машиностроительных изделий военного и специального назначения надежность (безотказная работа) должна выступать в качестве критерия оптимальности (что соответствует первоочередному требованию к надежности), а для изделий гражданского назначения надежность должна учитываться в ограничении (что отражает спрос);

– Большинство ЭММ не универсальны и позволяют найти оптимальный запас только при моделировании для конкретного вида изделий в

определенной отрасли. Более того, запас в системах МТО должен рассчитываться по большой номенклатуре различных элементов. Это выдвигает требование к многономенклатурной постановке задач, т.к. в целях снижения затрат на оформление заказа и транспортировку у одного поставщика часто заказывается большая номенклатура запасных частей (ЗЧ);

– Погрешность оптимизационных расчетов приводит к ситуации дефицита или избыточных запасов. По этой причине при моделировании должна учитываться относительная погрешность расчетов за предыдущий момент времени, зависящая от формируемых объемов запасов. Но существующие ЭММ не учитывают ситуации различного распределения аргумента (непрерывное или дискретное);

– Также существующие ЭММ не учитывают особенности конструкции машиностроительных изделий, таких как агрегатирование, стандартизация и унификация, напрямую влияющие на затраты формирования запаса; отсутствует учет структурной избыточности, характерный для сложных систем. В ЭММ используются стандартные функции отказа изделия, не предполагающие наличия избыточных элементов в структуре. В результате образуются перекрывающиеся потребности в однотипных элементах, значительно увеличивающие затраты на формирование запаса и снижающие экономическую эффективность МТО.

Результаты проведенного анализа позволили сформулировать задачи диссертационного исследования.

Во второй главе исследована конструкционная и эксплуатационная специфика машиностроительной продукции; систематизированы логистические факторы, оказывающие влияние на эффективность МТО; обоснован подход к учету структурной избыточности в ЭММ управления запасами; разработаны ЭММ оптимизации объема запасных частей с учетом резервирования конструкции изделия. Конструкционная и эксплуатационная специфика систематизирована в группы логистических факторов (Табл. 1), отражающих характерные особенности машиностроительной продукции.

Таблица 1.

Характеристика логистических факторов

Группа факторов	Индекс	Фактор	Характеристика
1	f_1	Стандартизация узла/агрегатирования и унификация	Высокая степень унификации позволяет осуществлять закупку и хранение однотипных ЗЧ для обслуживания сразу нескольких узлов изделия.
2	f_2	Специальности обслуживающего персонала	Перечень требуемых специальностей и квалификаций, необходимых для осуществления обслуживания техники.

Таблица 1 - окончание.

Группа факторов	Индекс	Фактор	Характеристика
2	f_3	Обучение обслуживающего персонала	График обучения персонала для достижения требуемых квалификаций, а также изучение особенностей обслуживания новых видов техники.
3	f_4	Упаковка и транспортирование ЗЧ	Необходимая упаковка и вид транспорта для перевозок зависит от вида ЗЧ и их характеристик (габариты, хрупкость и т.п). В случае перевозок несколькими видами транспорта необходимо анализировать упаковку, а также учитывать необходимость перегрузки.
4	f_5	Безопасность	Элементы и средства, обеспечивающие безопасность эксплуатации конечного изделия.
	f_6	Поиск неисправности в элементах и узлах	Системы диагностики и мониторинга неисправностей и высокой степени износа во всех элементах и узлах изделия.

Систематизация логистических факторов позволяет учесть их влияние на основные группы затрат, возникающих при формировании запаса:

- 1) Z_{i1} – затраты, связанные с приобретением и доставкой i -го вида ЗЧ;
- 2) Z_{i2} – затраты, связанные с хранением i -го вида ЗЧ;
- 3) Z_{i3} – затраты, связанные с «заморозкой» капитала в ЗЧ;
- 4) Z_{i4} – затраты, связанные с простоем машиностроительной продукции.

$$Z_i = \sum_{w=1}^4 Z_{iw} = \begin{cases} Z_{i1} = \begin{cases} \sum_{j=1}^4 k_j \cdot n_i \cdot C_i, & X_i \leq n_i \\ \sum_{j=1}^4 k_j \cdot (C_i \cdot n_i + (C_i + D_{di}) \cdot (X_i - n_i)), & X_i > n_i \end{cases} \\ Z_{i2} = \sum_{j=1}^4 r_j \cdot \bar{H}_i \cdot t_{sti} \cdot n_i, \\ Z_{i3} = \begin{cases} \sum_{j=1}^4 m_j \cdot C_{fi} \cdot (n_i - X_i), & X_i \leq n_i \\ 0, & X_i > n_i \end{cases} \\ Z_{i4} = \begin{cases} \sum_{j=1}^4 q_j \cdot (P_{bi} \cdot \bar{m}_i \cdot X_i), & X_i \leq n_i \\ \sum_{j=1}^4 q_j \cdot (P_{bi} \cdot [\bar{m}_i \cdot X_i + \bar{m}_{di} \cdot (X_i - n_i)]), & X_i > n_i \end{cases} \end{cases}$$

где C_i – стоимость единицы закупаемого предмета снабжения; k_j , r_j , m_j , q_j – коэффициенты влияния j -го логистического фактора на 1ую, 2ую, 3ую, 4ую группы затрат соответственно; D_{di} – затраты, связанные с доставкой единицы рассматриваемого вида ЗЧ; X_i – кол-во отказов (необходимых замен) за период между поставками рассматриваемого вида ЗЧ на склад; n_i – кол-во запасных

элементов данного вида ЗЧ; \bar{H}_i – средние расходы, связанные с хранением i -го вида ЗЧ в единицу времени; t_{sti} – время хранения i -го вида ЗЧ; C_{fi} – средние потери от вложения финансов в ЗЧ, которые не использованы за время хранения t_{sti} одного элемента ЗЧ рассматриваемого типа; P_{bi} – средние потери, связанные с простым машиностроительной продукции; \bar{m}_i – математическое ожидание времени установки рассматриваемого элемента; \bar{m}_{di} – математическое ожидание времени доставки рассматриваемого элемента.

В диссертации было предложено рассматривать систему «изделие + запас на складе». Такой подход позволил не только учесть вероятность отказа элемента в конечном изделии, но также учесть и вероятность отказа запасного элемента, находящегося на складе:

$$Q_C = \prod_{i=1}^N (Q_{Иi} \cdot Q_{запi}(n_i)), \quad (1)$$

где $Q_{Иi}$ – вероятность отказа изделия по причине выхода из строя i -го вида элемента; $Q_{запi}(n_i)$ – вероятность отказа запаса по i -му виду элемента.

Для сложных изделий, имеющих в своем составе несколько однотипных узлов, вероятность отказа определяется функцией, описывающей условие сохранения работоспособности при заданном количестве работоспособных элементов. Значения вероятности отказа запаса и вероятности отказа изделия рассчитываются с помощью биномиального закона распределения. Вероятность отказа i -го вида элемента q_i ; количество однотипных элементов в изделии m_i . Тогда условие отказа изделия можно выразить как $Q_{Иi} = q_i^{m_i}$, что не только учитывает вероятность отказа всех элементов, но отражает условие сохранения работоспособности (через наличие хотя бы одного исправного элемента).

Например, вероятность сохранения работоспособности изделия, состоящего из элементов трех типов с учетом условия сохранения работоспособности:

- не менее двух элементов первого типа работают безотказно;
- не менее одного работоспособного элемента второго и третьего типов соответственно;

формализуется следующим образом:

$$P(n) = P(n_1)P(n_2)P(n_3) = [1 - (q_1^{m_1} + m_1 q_1^{m_1-1} \cdot p_1)](1 - q_2^{m_2})(1 - q_3^{m_3}).$$

Такой подход позволит при определении запаса учесть структурную избыточность, а следовательно, предотвратить появление перекрывающихся потребностей в однотипных элементах.

Вероятность отказа запаса является функцией от всего набора запасных элементов: $\{n_j\} = (n_1, n_2, \dots, n_N)$ и рассчитывается аналогично.

В зависимости от состава парка эксплуатируемой техники на предприятии формируются различные объемы ЗЧ. В случае эксплуатации большого количества изделий, с однотипными узлами и агрегатами, аккумулируются большие объемы запасов на складах. При этом наличие уникальных специализированных изделий в единичных экземплярах на предприятии в большинстве случаев повышает стоимость запаса, но не его

объем (т.е. не требует большой складской площади). Таким образом, при определении оптимального запаса для различных видов ЗЧ необходимо применять разный математический аппарат, выбор которого зависит от относительной погрешности (σ), возникшей при расчетах в предыдущем периоде (что привело к появлению дефицита или избыточного запаса). Если $\sigma > \varepsilon$ (где ε допустимая погрешность расчетов), целесообразно использовать дискретный метод, в противном случае - непрерывный подход.

Пример решения задачи поиска оптимального объема запаса для изделий гражданского назначения при непрерывном распределении аргумента. Решение задачи будем строить методом неопределенных множителей Лагранжа. Введем функцию Лагранжа, отражающую особенности рассматриваемой системы:

$$F = \sum_{i=1}^N \bar{Z}_i(n_i) + \varphi \left[Q_0 - \left(\prod_{i=1}^N (Q_{Иi} \cdot Q_{запi}(n_i)) \right) \right]. \quad (2)$$

Для обоснования необходимого условия экстремума функции Лагранжа продифференцируем (2) по переменным n_i и φ , а результат приравняем к нулю. На основе метода множителей Лагранжа можно получить достаточные условия экстремума, требующие анализа (в простейшем случае) вторых производных функции Лагранжа F . Предполагая, что достаточные условия экстремума выполнимы, имеем:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{i=1}^N \bar{Z}_i(n_i)}{\partial n_i} - \varphi \frac{\partial \prod_{k=1}^N (Q_{Иk} \cdot Q_{запk}(n_k))}{\partial n_i} = 0, \\ \prod_{i=1}^N (Q_{Иi} \cdot Q_{запi}(n_i)) = Q_0. \end{cases} \quad (3)$$

Получим из первого уравнения системы зависимость для множителя Лагранжа:

$$\varphi^* = \varphi \prod_{k=1}^N (Q_{Иk} \cdot Q_{запk}(n_k)) = \frac{\frac{d\bar{Z}_i(n_i)}{dn_i}}{\frac{1}{Q_{запi}(n_i)} \cdot \frac{dQ_{запi}(n_i)}{dn_i}}. \quad (4)$$

Особенность правой части соотношения (4) состоит в том, что она справедлива для всех n_i . Выберем из множества n_i произвольный элемент \bar{n}_k , в примере выбрано число элементов первого типа n_1 , и выразим число элементов n_i ($i = 2, \dots, N$) каждого типа через число элементов n_i выбранного типа (n_1).

Соотношение (4) можно записать в виде:

$$f_i(n_i) = \bar{f}_k(\bar{n}_k), \quad i = 2, \dots, N,$$

но так как $\bar{f}_k(\bar{n}_k)$ известная функция, то можно решить это уравнение относительно n_i как функции числа элементов n_1 первого типа:

$$n_i = \tilde{f}_i(\bar{f}_k(\bar{n}_k)) \triangleq \psi_i(\bar{n}_k), \quad (5)$$

где \tilde{f}_i - функция, обратная к $f_i(n_i)$.

Далее по уравнению связи (второе уравнение системы (3)) находим запас элементов первого типа n_1 . Для этого по соотношению (1) построим зависимость для вероятности отказа Q_C системы:

$$Q_C = (Q_{И1} \cdot Q_{зап1}(n_1)) \prod_{i=2}^N (Q_{Иi} \cdot Q_{запi}(\psi_i(\bar{n}_k))).$$

Полученная зависимость Q_C зависит только от одного единственного числа n_1 элементов выбранного типа, остальные величины – известные параметры задачи. На Рис. 1 (а) продемонстрирован графический способ поиска оптимального числа ЗЧ выбранного типа n_1 . После этого рассчитываются величины объемов запасов элементов остальных типов по соотношению (5) с округлением до ближайшего целого числа, а также сумма затрат $\sum_{i=1}^N \bar{Z}_i(n_i)$ и вероятность безотказной работы P_0 при найденных объемах запасов.

Построим решение задачи оптимального управления запасами для специального оборудования при дискретном распределении аргумента.

Функция Лагранжа задаётся соотношением

$$F = \prod_{i=1}^N (Q_{Иi} \cdot Q_{запi}(n_i)) - \varphi \left(\sum_{i=1}^N \bar{Z}_i(n_i) - \bar{Z}_0 \right),$$

а уравнение связи – соотношением:

$$\sum_{i=1}^N \bar{Z}_i(n_i) = \bar{Z}_0.$$

В условиях дискретного подхода числа n_i неотрицательные, целые, а зависимость $Q_{запi}(n_i)$ не всегда является линейной функцией.

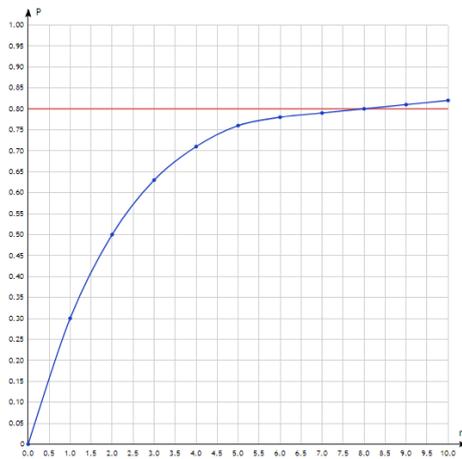
При нахождении экстремума функции Лагранжа от операции дифференцирования по аргументу n_i перейдем к разностным соотношениям. Тогда для величины φ^* имеем:

$$\varphi^* = \frac{1}{Q_{запi}(n_i)} \cdot \frac{Q_{запi}(n_i + 1) - Q_{запi}(n_i - 1)}{\bar{Z}_i(n_i + 1) - \bar{Z}_i(n_i - 1)}, \quad (6)$$

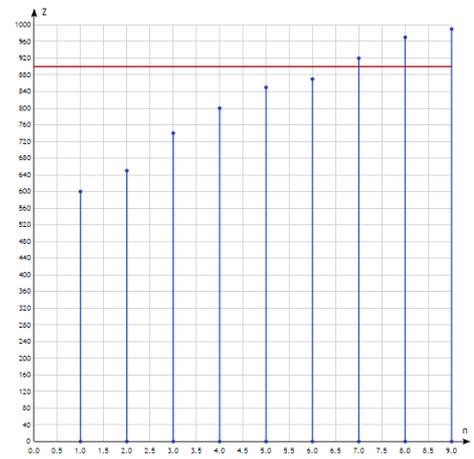
Заметим, что φ^* имеет один и тот же вид для всех величин n_i . Правую часть зависимости (6) записываем в виде равенства функций:

$$f_i(n_i) = \bar{f}_k(\bar{n}_k), \quad i = 2, \dots, N, \quad (7)$$

где $\bar{f}_k(\bar{n}_k)$ теперь известная функция от переменной \bar{n}_1 (по первому виду элементов из номенклатуры). Тогда (7) можно разрешить относительно n_i , т.е. найти значения объёмов запасов остальной номенклатуры n_2, n_3, \dots, n_N , а затем найти значение n_1 , удовлетворяющее уравнению связи. Пример графического решения задачи продемонстрирован на Рис. 1 (б). После этого рассчитывается вероятность отказа системы Q_C и сумма затрат.



а) непрерывное распределение аргумента



б) дискретное распределение аргумента

Рис. 1. Графический способ решения задачи

Опираясь на модели, разработанные в диссертационном исследовании, систематизируем их и представим в виде схемы комплекса ЭММ (см. Рис. 2). Данная схема комплекса ЭММ необходима для понимания и выбора подхода к решению задачи. Опираясь на данную схему, был разработан алгоритм выбора модели определения оптимального объема многономенклатурного запаса.

В **третьей главе** проведено исследование разработанного комплекса моделей с учетом заданных условий отказа системы «изделие + запас на складе» и найдено для частных случаев выражение величины n_i , а также проведена апробация и оценка эффективности моделей.

Зададим условие сохранения работоспособности для частного случая как наличие хотя бы одного работоспособного элемента как в конструкции изделия, так и в запасе. Тогда вероятность отказа системы «изделие + запас на складе» в целом:

$$Q_c = Q_{и} \cdot Q_{зап} = \prod_{i=1}^N (q_i^{m_i} \cdot q_i^{n_i}) = \prod_{i=1}^N q_i^{n_i+m_i}.$$

Исследовав модели при данном условии сохранения работоспособности, для машиностроительной продукции гражданского назначения в рамках непрерывного распределения аргумента, было получено выражение для числа элементов i -го типа:

$$n_i = -m_i + \frac{1}{\ln q_i} [\ln(\alpha_i q_k^{n_k+m_k}) - \ln(\alpha_k - (\alpha_k - \alpha_i) q_k^{n_k+m_k})],$$

где $\alpha_k = \frac{z_k}{\ln q_k}$ и $\alpha_i = \frac{z_i}{\ln q_i}$.

Для машиностроительной продукции специального назначения в рамках дискретного подхода выражение для числа элементов i -го типа принимает вид:

$$n_i = \frac{1}{\ln q_i} \ln \left[\frac{f_k(n_k, i)}{1 + q_i^{m_i} \cdot f_k(n_k, i)} \right],$$

где $f_k(n_k, i) = \frac{z_i}{z_k} \frac{1}{q_i^{m_i-1}} \frac{(1-q_k^2)}{(1-q_i^2)} \frac{q_k^{n_k+m_k-1}}{(1-q_k^{n_k+m_k})}$.

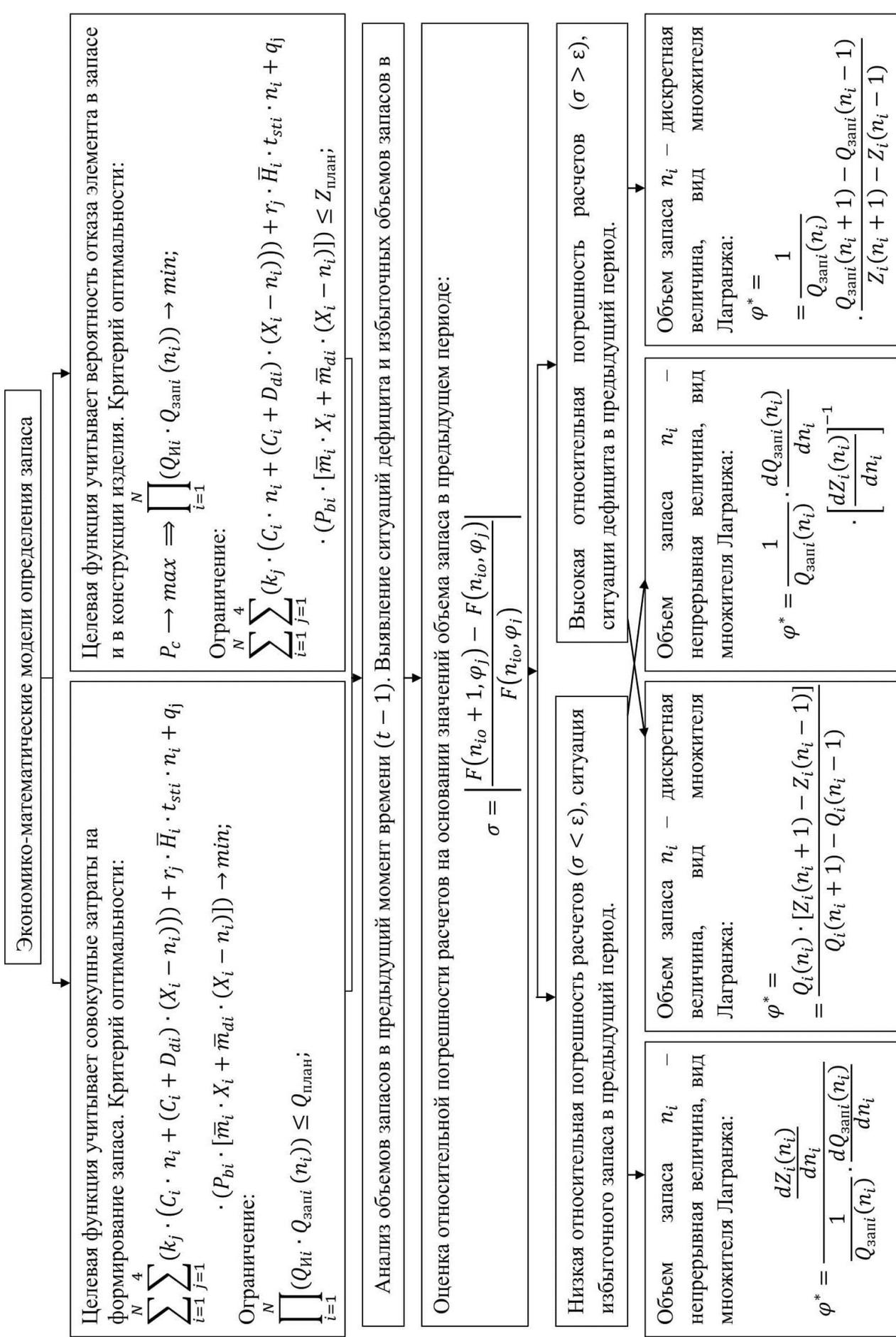


Рис. 2. Схема комплекса разработанных в диссертационном исследовании ЭММ

На основании данных о фактической интенсивности отказов была скорректирована вероятность отказа для каждого вида ЗЧ. С учетом скорректированной вероятности отказа и условий сохранения работоспособности, используя уравнение (1) осуществлен расчет вероятности отказа работоспособности системы «изделие + запас на складе» в целом. Автоматизация процесса определения оптимального объема запаса с использованием разработанных моделей была осуществлена с помощью алгоритма, представленного на (Рис.4).

Проведена оценка эффективности разработанных моделей на основе данных о фактических отказах элементов вертолета базовой модели МИ-8 (АО «Московский вертолетный завод имени М.Л. Миля»), полученных из открытых источников. Был проведен анализ по ситуациям дефицита и избыточного запаса за прошлые периоды, затем был рассчитан оптимальный объем запасов по разработанным в диссертации моделям на тот же период (по выбранным позициям номенклатуры). В результате сравнения фактических объемов запасов в 2017 году и в случае применения разработанных моделей (см. Рис. 3) продемонстрирована эффективность комплекса ЭММ.

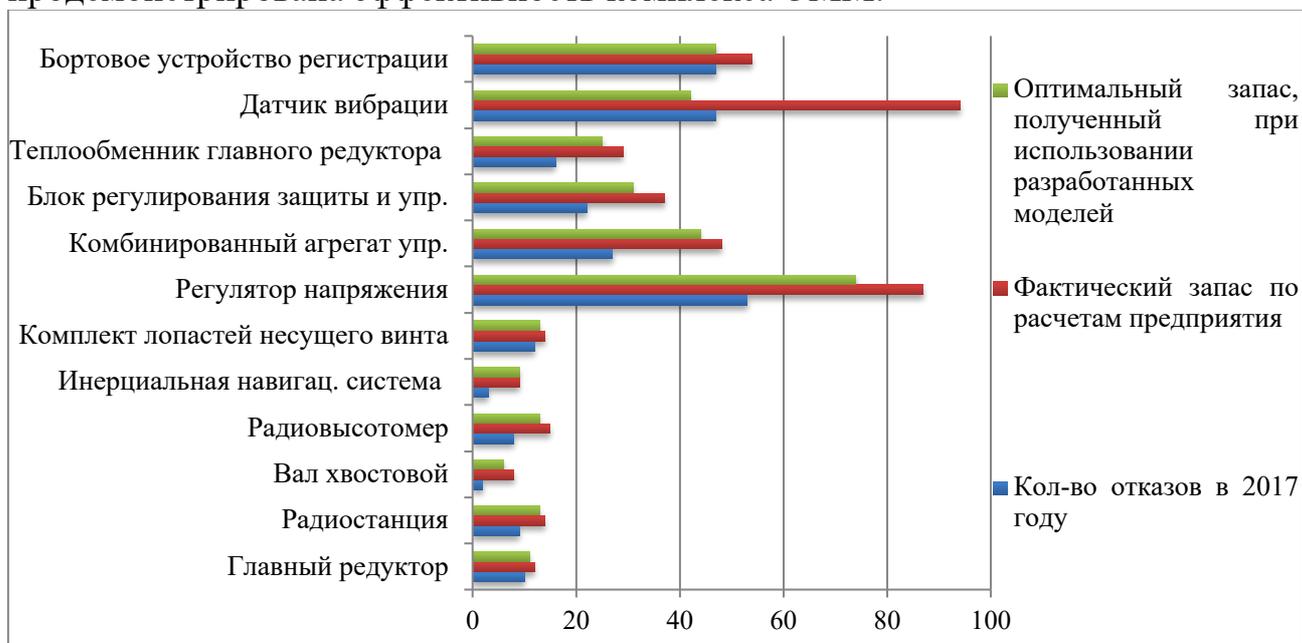


Рис. 3. Сравнение рассчитанного объема запаса с количеством отказов за 2017 год

При формировании запаса с применением разработанных моделей затраты, связанные с приобретением ЗЧ, сократились примерно на 12,4%. Такая высокая эффективность объяснена наличием дорогостоящих узлов и агрегатов на вертолетах, стоимость которых может достигать 3% от совокупных затрат, связанных с формированием запаса требуемого объема. Таким образом, сокращение запаса элементов данного вида даже на одну единицу приводит к существенному снижению совокупных затрат на процессы МТО. На текущем этапе внедрение разработанного комплекса моделей позволило обеспечить снижение затрат на материально-техническое обеспечение эксплуатации вертолетов на весь жизненный цикл изделия в среднем до 3%.

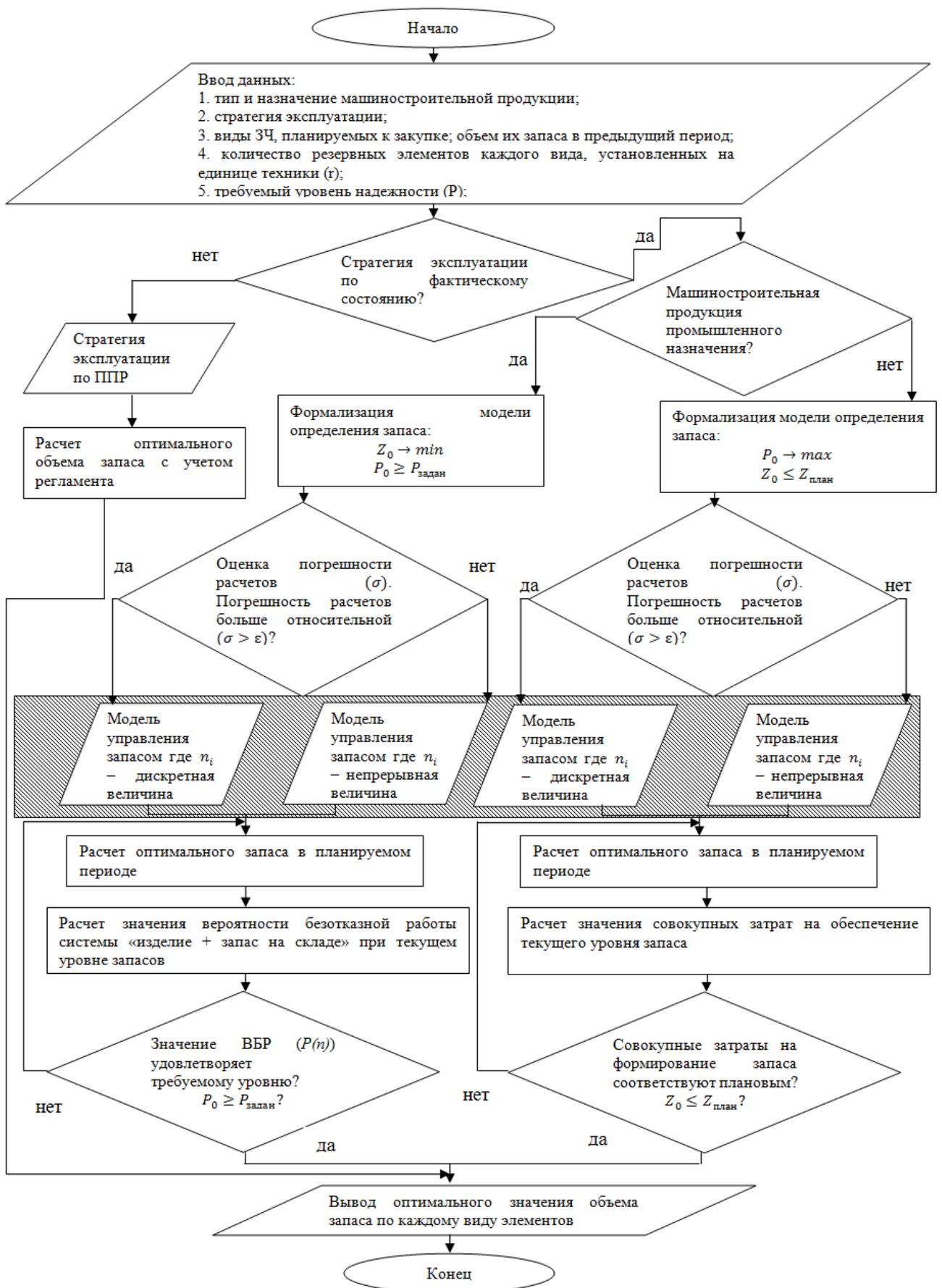


Рис. 4. Алгоритм выбора модели для определения оптимального объема ЗЧ с выделением комплекса экономико-математических моделей

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате проведенного анализа экономико-математических моделей ТУЗ в системах материально-технического обеспечения были выявлены основные недостатки, не позволяющие использовать их для формирования и управления запасами в системах МТО машиностроительной продукции на этапе эксплуатации.

2. При формировании запаса запасных частей в ЭММ ТУЗ необходимо учитывать особенности конструкции и эксплуатации изделий. В диссертации были выделены и систематизированы логистические факторы, оказывающие влияние на эффективность МТО, что позволило учесть их при построении целевой функции и ограничений ЭММ.

3. Обоснован подход к учету резервирования элементов в ЭММ при определении оптимального объема запасных частей. Это позволило задать условие сохранения работоспособности изделия в целом в зависимости от его структуры, что отражается на значении вероятности безотказной работы изделия. В результате это дало возможность предотвратить появление перекрывающихся потребностей в однотипных элементах.

4. Разработан комплекс ЭММ оптимизации запаса для машиностроительной продукции различного назначения при различных распределениях аргумента (дискретный и непрерывный) с учетом структурной избыточности изделий; в моделях учтены логистические факторы, отражающие особенности конструкции и эксплуатации изделий. Комплекс ЭММ учитывает относительную погрешность расчетов за предыдущий момент времени, что позволяет минимизировать ситуации дефицита или избыточных запасов на следующий период.

5. Разработана схема комплекса ЭММ, необходимая для выбора математического аппарата для решения задачи. На основе схемы комплекса ЭММ был разработан алгоритм выбора модели для определения оптимального объема многономенклатурного запаса с учетом требуемого критерия эффективности и видом аргумента. Все модели были реализованы в пакете MAPPLE.

6. Экономическая целесообразность внедрения разработанного комплекса ЭММ управления запасом была оценена на предприятии АО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля». Была собрана информация о фактических отказах элементов из открытых источников, на основании которой был проведен расчет оптимального объема запаса. По результатам оценки удалось снизить затраты, связанные с формированием запаса от 6 до 13%, в зависимости от наименований номенклатуры запасных частей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Оптимизация многономенклатурного запаса в системах материально-технического обеспечения машиностроительной продукции гражданского назначения // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 3. С. 19-24. (0,56 п.л./ 0,35 п.л.)

2. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Оптимизация многономенклатурного запаса для техники военного и специального назначения при заданных условиях отказа // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 3(81). С. 82-87. (0,5 п.л./ 0,35 п.л.)

3. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Модель оптимизации многономенклатурного запаса для техники военного и специального назначения в условиях малого размера парка // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 2(80). С. 9-14. (0,5 п.л./ 0,35 п.л.)

4. Омельченко И.Н., Бром А.Е., Сидельников И.Д. Критерий эффективности цепей поставок и построение целевой функции в задачах оптимизации материально-технического снабжения для сложной техники // Организатор производства. 2017. № 4. С. 83-91. (0,69 п.л./ 0,4 п.л.)

5. Сидельников И.Д., Барабушка А.С., Бром А.Е. Особенности конструкции и обслуживания техники как ключевые факторы логистики при создании цепей поставок в машиностроении // Логистика и управление цепями поставок. 2017. № 4(81). С. 33-40. (0,63 п.л./ 0,4 п.л.)

6. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Организация материального снабжения для техники военного и специального назначения // Вестник московского государственного областного университета. Серия: Экономика. 2016. № 4. С. 56-61. (0,44 п.л./0,3 п.л.)

7. Сидельников И.Д. К вопросу об экономическом обосновании стратегий ремонтного обслуживания машиностроительной продукции // Экономика и предпринимательство. 2016. № 11-4. С. 875-879. (0,69 п.л.)

Публикации в других изданиях:

8. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Стратегические аспекты взаимодействия с поставщиками для производителей готовой продукции машиностроения // конференция «Стратегическое планирование и развитие предприятий». Москва: ЦЭМИ РАН, (11-12 апреля) 2017. (0,2 п.л./0,1 п.л.)

9. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Проблема обеспечения эффективного материально-технического снабжения для сложной техники // конференция «Будущее машиностроения России». Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, (25-28 сентября) 2017. (0,2 п.л./0,1 п.л.)

10. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Организация материально-технического обеспечения для продукции, эксплуатируемой по техническому ресурсу// конференция «Эффективность организации и управления промышленными предприятиями: проблемы и пути решения». Воронеж: ВГТУ, (14-15 ноября) 2017. (0,31 п.л./0,2 п.л.)