УДК 004.65

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО КОМПЛЕКТА ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Ю. Б. Щенёва, старший преподаватель кафедры ВПМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6351-0399, e-mail: Shenyova@yandex.ru
А. Н. Пылькин, д.т.н., профессор кафедры ВПМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-9925-2870, e-mail: pylkin.a.n@rsreu.ru
К. А. Майков, д.т.н., профессор кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0003-1864-2397, e-mail: maikov@bmstu.ru
Е. С. Щенёв, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0005-8438-7445, e-mail: Jheka1235317@gmail.com

*Рассматривается задача построения модели процесса формирования специального комплекта оборудования для технической системы с использованием методов многокритериальной оптимизации для. **Целью работы** является разработка модели специального комплекта оборудования технической системы, на основе которой будет реализована система поддержки принятия решений для поиска рационального решения с использованием методов многокритериальной оптимизации. Предлагается построение оптимизационной модели процесса формирования специального комплекта оборудования для технической системы. Определяются основные критерии для многокритериальной оптимизации. На их основе составляются целевые функции и устанавливаются ограничения на модель. Выбираются рациональные методы многокритериальной оптимизации. Отличительной особенностью полученных результатов от ранее изученных является применение универсального критерия в качестве основного при выборе рационального состава специального комплекта технического оборудования, позволяющего успешно решать задачу многокритериальной оптимизации данных в системах поддержки принятия решений. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предлагаемой модели построения системы поддержки принятия решений для различных областей знаний, в частности для технической. Новизна исследования заключается в автоматизации процесса принятия решений с использованием методов многокритериальной оптимизации.*

Ключевые слова: *многокритериальная оптимизация, многокритериальный анализ данных, системы поддержки принятия решений, математическая модель, техническая система, специальный комплект оборудования, информационная система.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-130-142

Введение

Многокритериальный анализ данных является важным инструментом в системах поддержки принятия решений (СППР), особенно в ситуациях, когда необходимо учитывать одновременно несколько критериев, часто противоречащих друг другу. Основная цель заключается в выборе оптимального решения среди множества альтернатив, каждая из которых характеризуется несколькими параметрами или критериями. Основная трудность заключается в том, что критерии оценки часто противоречат друг другу, вследствие чего в большинстве ситуаций невозможно выбрать решение, которое превосходило бы остальные одновременно по каждому критерию [1]. Поэтому для принятия решений используют один или комбинацию из нескольких многокритериальных методов принятия решений (ММПР).

Процессы стратегического планирования решений, реализуемые через системы поддержки принятия решений, являются высокоэффективными [2, 3]. Благодаря использованию

СППР, процесс выбора наиболее эффективных методов многокритериальной оптимизации значительно упрощается, что позволяет учитывать конкретные цели и потребности, обеспечивая более обоснованный и осознанный подход к принятию решений.

Сложность многокритериальных задач определяется не только числом критериев, но и многообразием их типов, способом представления, зависимостью друг от друга и необходимостью агрегирования.

Часто критерии взаимосвязаны друг с другом, что добавляет дополнительные трудности, поэтому необходимо учитывать влияние одного критерия на другой, что делает процесс принятия решений комплексным.

Правильное принятие решений основывается на применении систематического подхода, включающего четкий алгоритм действий. Важно понимать, что оптимальный выбор зачастую зависит одновременно от нескольких факторов, каждый из которых имеет свою значимость и специфику влияния на итоговый результат.

В данной статье рассматривается одна из прикладных задач многокритериального анализа данных по оптимизации состава технического оборудования вооружением и военной техникой (ВВТ) Воздушно-десантных войск (ВДВ).

Теоретические исследования и анализ состояния вопроса по обоснованию направлений развития подвижных ремонтных мастерских [4, 5] показали необходимость разработки модели специального комплекта оборудования технической системы, на основе которой будет реализована система поддержки принятия решений для поиска рационального решения с использованием методов многокритериальной оптимизации.

Постановка задачи

Одним из проблемных вопросов является несоответствие состояния существующей технической системы для подвижных мастерских технического обслуживания и ремонта (ПМТОР) и невозможности выполнения в полном объеме процесса войскового ремонта и технического обслуживания современных и перспективных образцов ВВТ ВДВ.

Возникает противоречие между необходимостью обеспечения требуемых возможностей ПМТОР ВДВ для их эффективного применения и отсутствием уточненного научно-обоснованного методического аппарата (инструментария), позволяющего осуществлять корректировку состава технической системы для универсальной мастерской ВДВ.

Для решения поставленного проблемного вопроса и устранения существующих противоречий требуется разработка модели специального комплекта оборудования технической системы, на основе которой будет реализована система поддержки принятия решений для поиска рационального решения с использованием методов многокритериальной оптимизации.

Теоретическая часть

Наличие в системе технического обеспечения ВДВ подвижных средств ремонта (ПСР) и технического имущества делает возможным успешное функционирование подсистемы восстановления техники как основной, решающей задачу возвращения машины в строй после эксплуатационных или боевых повреждений. Это, в свою очередь, влияет на поддержание требуемого «коэффициента технической готовности» части и на решение стоящих перед ней задач. При этом в военное время, а зачастую и в мирное, когда решающим фактором являются сроки их выполнения, вопрос работоспособности машины будет определяющим наряду с ее исправностью.

Обеспечение ПСР необходимым по номенклатуре, количеству, массе и объемам техническим оборудованием **различными** способами на сегодняшний день является неактуальной задачей, поэтому в данной статье предлагается в качестве основного критерия при выборе рационального состава ремонтного комплекса применить **универсальный критерий**, позволяющий успешно решать задачу многокритериальной оптимизации данных в СППР. Если при этом в математической модели, описывающей процесс формирования технической системы для специального комплекта технического оборудования (СКТО), учитывать времен-

ной фактор, который оказывает непосредственное влияние на сроки выполнения поставленных задач, выбор такого критерия представляется достаточно обоснованным.

Процесс оптимизации будет построен в такой последовательности:

1) составляется полный перечень инструментов, применяемых для ремонтно-восстановительных работ на отдельных агрегатах систем объектов;

2) производится учет повторений применения отдельного инструмента таким образом, чтобы его исключение не привело к сокращению перечня ремонтируемых и восстанавливаемых агрегатов;

3) вычисляются пользовательские свойства полученного комплекта: номенклатура, количество, масса, объем, время ремонта, стоимость ремонта;

4) если пользовательские свойства не удовлетворяют некоторым требованиям (габаритам, весу, стоимости), то необходимо оптимизировать часть инструмента;

5) чтобы исключить инструмент, необходимо провести ранжирование по его значимости для проведения ремонтно-восстановительных работ;

6) для ранжирования (упорядочения) инструмента следует ввести показатель **универсальности**, характеризующий его значимость. Правило ранжирования следующее: ранг инструмента тем выше, чем чаще он применяется в ремонтно-восстановительных операциях. При этом необходимо учесть, что ранг инструмента определяется не только его значимостью, но и номенклатурой объектов, а также решаемыми техническими задачами.

Фрагмент структуры объекта технической системы, подлежащего ремонту, представлен на рисунке 1.

Рисунок 1 – Фрагмент структуры объекта ремонта технической системы
Figure 1 – Fragment of technical system repair facility structure

Из рисунка 1 заключаем, что объект ремонтного комплекса состоит из основных частей, каждая из которых содержит составные части (системы объекта). Система объекта включает в себя ряд элементов из сборочных единиц, узлов, агрегатов (далее – агрегатов). В том случае, когда агрегат неработоспособен, то он нуждается в ремонте, который сводится к его демонтажу и дальнейшей замене новым работоспособным. Для выполнения этих действий в состав РК должны входить необходимые инструменты и принадлежности, причем для каждого агрегата свой уникальный набор технического оборудования (далее набор), а для составной части (системы) объекта – свой комплект ТО.

При разработке СППР необходимо учитывать следующие факторы. Для того чтобы усовершенствованная техническая система ремонтного комплекса (РК) обеспечивала ремонт произвольного объекта, необходимо предусмотреть наличие в РК полного состава уникальных наборов технического оборудования (ТО). Однако может возникнуть ситуация, когда

1) с точки зрения процесса ремонта этот набор технического оборудования будет избыточен, поскольку возможны повторения отдельных составляющих элементов;

2) с точки зрения транспортировки необходимо затратить значительные средства, поскольку он обладает достаточно большим весом и габаритными размерами;

3) с экономической точки зрения он дорог в силу своей избыточности.

Вышеизложенное означает, что необходимо разработать модель процесса формирования специального комплекта оборудования для технической системы с использованием многокритериальной оптимизации, которая позволит устранить перечисленные выше недостатки. Необходимо убедиться, что это наилучшее решение относительно выбранных критериев. На основе полученной модели следует разработать систему поддержки принятия решений для поиска рационального решения с использованием методов многокритериальной оптимизации.

На *первом* этапе построения модели проведена систематизация и классификация ТО из эксплуатационной и ремонтной документации.

Из каждого ремонтного набора выбираются отдельные инструменты, приборы и приспособления в инструментальное множество $I = \{i_1, i_2, ..., i_n\}$. Это множество представляет собой некоторый список неповторяющихся объектов.

Аналогично составляется множество всех имеющихся элементов $E = \{e_1, e_2, ..., e_m\}$. Однако из этого множества не исключены однотипные элементы, так как для них могут понадобиться различные наборы.

Построим таблицу распределения инструмента, перечислив в её строках объекты множества *E,* а в столбцах – элементы инструментального множества *I.*

Таблица 1 – Распределение инструмента

Table 1 – Tool distribution

	i_1	i_2	…	i_s	…	i_n	P
e_1	a_{11}	a_{12}	…	a_{1s}	…	a_{1n}	p_1
e_2	a_{21}	a_{22}	…	a_{2s}	…	a_{2n}	p_2
…	…	…	…	…	…	…	…
e_t	a_{t1}	a_{t2}	…	a_{ts}	…	a_{tn}	p_3
…	…	…	…	…	…	…	…
e_m	a_{m1}	a_{m2}	…	a_{ms}	…	a_{mn}	p_m
	$a_1 = \sum_{k=1}^{m} a_{k1}$	$a_2 = \sum_{k=1}^{m} a_{k2}$	…	$a_s = \sum_{k=1}^{m} a_{ks}$	…	$a_m = \sum_{k=1}^{m} a_{km}$	$\sum_{j=1}^{m} p_j = 1$

Ячейки таблицы 1 заполняются по следующему правилу: если для ремонта элемента e_t необходим инструмент i_s, то в ячейку на пересечении *t* строки и столбца *s* записывается необходимое количество указанного инструмента. Иначе в ячейку таблицы заносится нулевое значение. Таким образом, a_{ts} – это количество инструмента i_s, которое необходимо иметь, чтобы произвести ремонт элемента e_t. В последнем столбце таблицы записаны вероятности повреждений соответствующих элементов, то есть вероятности возможного ремонта элемента. Стоит отметить, что возможно и другое ранжирование инструмента.

Для того чтобы получить полное (максимально возможное) количество инструмента, необходимого для одновременного ремонта всех элементов, просуммируем содержимое всех столбцов, получаем $S_A^* = (a_1^*, a_2^*, ..., a_n^*)$. Сумма вероятностей в последнем столбце равна единице.

Для продолжения построения модели необходимо выполнить следующие действия:

1) отсортировать столбцы матрицы так, чтобы самые востребованные инструменты были расположены в первых столбцах, а самые невостребованные инструменты в последних.

2) отсортировать строки матрицы так, чтобы в её последней строке величины не возрастали. Это означает, что самые часто ремонтируемые агрегаты (часто востребованные инструменты) будут расположены в верхних строках, а самые редко ремонтируемые (редко востребованные инструменты) в последней строке.

3) вычеркнуть те столбцы таблицы, в ячейках которых записаны только нули. Это означает, что данный элемент не нужен при указанном наборе инструментов.

Полученная из выделенных ячеек таблицы 1 матрица A^* описывает минимальное множество инструментов, необходимое для комплексного ремонта, с которыми можно отремон-

тировать заданное множество агрегатов системы объекта одновременно, при этом каждый элемент ремонтируется только своим зарезервированным инструментом:

$$S_A^* = (a_1^*, a_2^*, ..., a_n^*),\ S_A^* = \sum_{j=1}^{n} a_j^*,$$

где S_A^* – полное количество имеющихся инструментов и приспособлений.

На *следующем* этапе разработки модели определяется матрица ресурсов.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1s} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2s} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{t1} & a_{t2} & \dots & a_{ts} & \dots & a_{tn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{ms} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Обозначим произвольную l-ю строку матрицы A^l и определим ее следующим образом: $A^l = (a_{l1}, a_{l2}, \dots, a_{ls}, \dots, a_{ln})$.

Будем говорить, что строка A^{l2} строго доминирует над строкой A^{l1}, если выполняются неравенства:

$$a_{l1j} \le a_{l2j}, j = \overline{1,n}.$$

С прикладной точки зрения это означает, что набор технического оборудования, используемый для ремонта элемента e_{l2}, может быть использован одновременно и для ремонта элемента e_{l1}. При планировании ресурсов элемент e_{l1} может быть исключен из процесса планирования, поэтому исключаем строку A^{l1} из матрицы. При этом, может быть, теряется возможность одновременного ремонта элементов e_{l1} и e_{l2}.

Аналогично можно говорить о доминировании нескольких строк матрицы над A^{l1}. После выполнения операций исключения получена новая матрица A^+, для которой набор инструментов ремонта произвольного элемента нельзя заменить никакими наборами других элементов. Полученная матрица A^+ описывает минимальное множество инструментов для ремонта:

$$S_A^+ = (a_1^+, a_2^+, ..., a_n^+),\ S_A^+ = \sum_{j=1}^{n} a_j^+$$

Таким образом, из исходной матрицы была выделена её часть, называемая базисным минором.

Для ремонта произвольного элемента определим минимальный набор инструментов и найдем минимальную матрицу ресурсов. Для этого в каждом столбце матрицы A^+ найдем максимальное значение. Вычеркнем из матрицы только те строки, в которых нет ни одного такого значения. Таким образом, получили минимальную матрицу ресурсов инструментов A^-, которыми могут быть отремонтированы все элементы рассматриваемого объекта:

$$S_A^- = (a_1^-, a_2^-, ..., a_n^-),\ S_A^- = \sum_{j=1}^{n} a_j^-.$$

Стоит отметить, что для ремонта некоторого элемента требуется воспользоваться инструментом, предназначенным для ремонта других элементов.

Для каждого набора инструментов следует определить двусторонние ограничения – множество допустимых вариантов наборов инструментов или приспособлений, представляющих прикладной интерес, гарантирующие выполнение ремонтных работ для произвольного элемента составной части системы объекта:

$$a_j^- \le x_j \le a_j^+, j = \overline{1,n}.$$

Следующий этап позволяет определить лучшие варианты наборов инструментов на множестве допустимых значений с использованием многокритериальной оптимизации.

Для определения лучших вариантов наборов инструментов на множестве допустимых значений необходимо использовать многокритериальную оптимизацию, которая представляет собой процесс одновременной оптимизации конфликтующих целевых функций в некоторой области определения. Поиск решения, при котором будут получены приемлемые значения целевых функций, является целью многокритериальной оптимизации.

Для этой цели, руководствуясь прикладной постановкой задачи исследования, необходимо определить целевые функции. Такими функциями будут:

– минимизации полного времени ремонта объекта;

– минимизации суммарной массы наборов ТО;

– минимизации стоимости используемых наборов ТО;

– максимизация вероятности восстановления объекта.

Каждая из этих целевых функций достигает своего экстремального значения на некотором оптимальном наборе технического оборудования. Необходимо заметить, что полученные наборы ТО могут отличаться друг от друга.

Определим матрицу *X,* аналогичную матрице *A,* содержащую текущую конфигурацию наборов инструментов и приспособлений. Будем называть эту матрицу текущим набором инструментов и приспособлений. Положим, что $S_x=(x_1, x_2, \ldots, x_s, \ldots, x_n)$ – полный набор инструментов и приспособлений (суммы столбцов матрицы *X*). Вычислим сумму $S_X = \sum_{j=1}^{n} x_j$.

Перейдем к построению этих функций.

Целевая функция минимизации полного времени ремонта объекта

Поскольку заранее неизвестны условия ремонта, то полное время ремонта элементов составных частей систем объектов линейно зависит от общего количества имеющихся инструментов S_x. Выше были определены максимально возможное количество инструмента и приспособлений S_A и минимально допустимое количество инструмента и приспособлений S_A^-.

Определим целевую функцию минимизации полного времени ремонта объекта:

$$J_T(X) = \frac{S_A - S_X}{S_A - S_A^-} \Rightarrow \min .$$

Целевая функция минимизации суммарной массы наборов ТО

Пусть *X* – матрица текущего набора инструментов и приспособлений, а S_x –полный набор ТО. Каждый инструмент имеет свою массу (вес). Для определения полного веса следует перемножить вес единицы инструмента или приспособления m_j на его количество x_j . Получаем целевую функцию минимизации суммарной массы наборов ТО:

$$J_M(X) = \sum_{j=1}^{n} m_j \cdot x_j \Rightarrow \min .$$

Целевая функция минимизации стоимости используемых наборов ТО

Если *X* – матрица текущего набора инструментов и приспособлений, а S_x –полный набор ТО. Каждый инструмент имеет свою стоимость. Для определения полной стоимости набора следует перемножить стоимость одной единицы инструмента или приспособления c_j на его количество x_j. Получаем целевую функцию минимизации стоимости используемых наборов ТО:

$$J_C(X) = \sum_{j=1}^{n} c_j \cdot x_j \Rightarrow \min .$$

Целевая функция максимизация вероятности восстановления объекта

Данная целевая функция использует информацию о вероятности или частоте необходимого ремонта элемента. При имеющихся ограничениях следует предусмотреть в наличии те инструменты и приспособления, которые применяются в ремонте элементов, наиболее часто выходящих из строя. Если будут исключены из модели такие элементы, то одновременно

уменьшается время восстановления, вес и стоимость инструмента и приспособлений. Построим такую целевую функцию.

$$J_p(p) = \sum_{j=1}^{m} p_j = p \,,$$

где p – вероятность ремонта инструмента ТО.

Аргументом этой функции являются строки матрицы, рассмотренной выше, или, другими словами, элементы составных частей систем объекта. Эта функция непосредственно не участвует в поиске решения, а только определяет область поиска решения.

Задача принятия решения с использованием методов многокритериальной оптимизации появляется тогда, когда имеется несколько возможных вариантов действий (альтернатив), каждый из которых приводит к достижению необходимого результата. При этом требуется выбрать наилучший в определенном смысле результат с учетом различных критериев и ограничений.

Постановка задачи принятия решений многокритериальной оптимизации является *следующим* этапом при построении модели и может быть сформулирована следующим образом.

Пусть определено множество различных элементов входящих с состав составных частей систем объектов $E = \{e_1, e_2, ..., e_m\}$ и задан набор (множество) различных инструментов и приспособлений, инструментальное множество $I = \{i_1, i_2, ..., i_n\}$. По заданной матрице ресурсов

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1s} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2s} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{t1} & a_{t2} & \dots & a_{ts} & \dots & a_{tn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{ms} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

необходимо определить оптимальное количество инструментов и приспособлений $X=(x_1, x_2, ..., x_s, ..., x_n)$, определенных на множестве допустимых значений $a_j^- \le x_j \le a_j^+, j = \overline{1,n}$, при котором достигаются экстремальные значения функций:

$$\begin{cases} J_T(X) \Rightarrow \min \\ J_M(X) \Rightarrow \min \\ J_C(X) \Rightarrow \min \end{cases},$$

при условии, что вероятность успешного ремонта будет не меньше величины p.

Подводя итог вышесказанному, заключаем, что получена модель процесса формирования специального комплекта оборудования технической системы с использованием методов многокритериальной оптимизации как основа системы поддержки принятия решений. Определены основные критерии – минимизация затрат на его эксплуатацию. Сформированы целевые функции, отображающие связь между критерием и параметрами модели. В основе разработанной модели лежит задача многокритериальной оптимизации по выбору рационального комплекта инструментов и приспособлений, обеспечивающего эффективное функционирование подвижной технического обслуживания и ремонта.

Экспериментальные исследования

Для определения лучших вариантов наборов инструментов на множестве допустимых значений необходимо использовать методы многокритериальной оптимизации, которые представляют собой процесс одновременной оптимизации конфликтующих целевых функций в некоторой области определения. Поиск оптимального решения, при котором будут получены приемлемые значения целевых функций, является основной задачей данного раздела. В случае многокритериальных оценок результатов критерии часто противоречивы, поэтому в качестве основного критерия при выборе рационального состава ремонтного комплекса

предлагается использование универсального критерия, который позволяет успешно решать задачу многокритериальной оптимизации данных в СППР.

Важным шагом при построении модели процесса формирования специального комплекта оборудования для технической системы является *разработка алгоритма.*

Алгоритм построения комплекта ТО для составной части представляет собой процедуру исключения избыточности инструментов. Результатом реализации этого алгоритма будет выделение некоторого множества технических инструментов, позволяющего выполнить ремонтные работы на составной части (системе объекта) для одного объекта ВВТ.

Шаг 1. Выбрать неотмеченный инструмент мультимножества *I*. Пусть это будет i_k. Выбор осуществляется произвольным образом. Отметка необходима для того, чтобы повторно не проверять уже просмотренные технические инструменты.

Шаг 2. Из мультимножества *I* выбрать технические инструменты, сравнимые с выбранным инструментом на предыдущем шаге. Необходимо заметить, что таких технических инструментов может быть несколько или не быть совсем $i_p \cong i_k, \forall p : i_p \in I, p \in \overline{1,|I|}, p \neq k$.

Шаг 3. Построить доминирующую последовательность сравнимых технических инструментов $i_{p_1}, i_{p_2}, ..., i_k, ..., i_{p_s}$ и выбрать среди них доминирующий – верхнюю грань $i_{p_1} \le i_{p_2} \le ... \le i_k \le ... \le i_{p_s}$ где i_{p_s} – верхняя грань.

Шаг 4. Удалить из мультимножества *I* все сравниваемые элементы последовательности, кроме верхней грани. Верхнюю грань отметить. На этом шаге из мультимножества исключаются все инструменты, использование которых может быть заменено другими.

Шаг 5. Проверить существование неотмеченных технических инструментов на мультимножестве *I*.

Шаг 6. Если неотмеченных инструментов нет, то алгоритм завершает работу. На мультимножестве *I* нет сравнимых технических инструментов, поэтому оно становится множеством уникальных инструментов *I*.

Шаг 7. Если на мультимножестве *I* есть в наличии неотмеченные инструменты, то перейти на шаг 1. Этот шаг фактически завершает процесс исключения из мультимножества *I* всех сравниваемых технических инструментов, за исключением одного, который своими свойствами перекрывает все технические операции, в которых задействованы инструменты. Наличие неотмеченных инструментов означает, что процесс исключения, ориентированных на выполнение одних и тех же технических процессов, не окончен.

На *следующем* этапе была спроектирована и реализована база данных (БД) [6] комплектации наборов ТО в мастерских по ремонту ВВТ. На основании проведенной систематизации данных было сформировано мультимножество ТО (*I*), которое по рассмотренному выше алгоритму, преобразовывалось в уникальное множество *I* для осуществления технического процесса войскового ремонта методом замены узлов и агрегатов (рис. 2)

Для формирования специальных комплектов ТО на множестве допустимых значений использовались методы многокритериальной оптимизации (главного критерия, линейной свертки, идеальной точки, приоритетов, последовательных уступок), с помощью которых осуществлялся процесс одновременной оптимизации конфликтующих целевых функций в заданной области определения.

При использовании метода *главного критерия* целевой функцией выбирается один из функционалов, который наиболее полно отражает цель принятия решений. Остальные требования к результату учитываются с помощью введения необходимых дополнительных ограничений. Таким образом, задача многокритериальной оптимизации решается как однокритериальная задача поиска максимума функционала на новом допустимом множестве. Основным недостатком использования этого метода является возникновение нескольких «главных» критериев, которые могут находиться в противоречии друг с другом.

Суть *метода линейной свертки* заключается в том, что векторный критерий оптимальности заменяется скалярным показателем, благодаря суммированию отдельных частных целе-

вых функций с весовыми коэффициентами. Однако сложность выбора окончательных значений весов при разнородных критериях оптимизации представляет собой непростую задачу, поскольку точное определение значимости каждого показателя зависит от экспертных оценок.

Метод *идеальной точки*, или смещенного идеала, позволяет сформировать «идеальный» объект, в рассматриваемом случае, *универсальный* комплект ТО, оптимальный комплект ТО относительно каждого критерия. По найденному расстоянию до идеального объекта осуществляется анализ множества комплектов ТО на соответствие (степень близости) универсальности и исключение неподходящих вариантов. Завершающим этапом многокритериальной оптимизации с использованием данного метода является оценка полученного мультимножества инструментов (оптимальное решение). Метод идеальной точки сводит исходную многокритериальную задачу к решению однокритериальной задачи. Стоит отметить сложность определения относительной важности критериев.

В случае сравнения альтернативных вариантов построения специальных комплектов ТО путем ранжирования их значимости используется *метод приоритетов*. С его помощью происходит упорядочение вариантов выбора относительно заданных критериев с использованием весовых коэффициентов. Для ранжирования комплектов ТО используется интегральная оценка. Лучшим вариантом считается вариант с наибольшей интегральной оценкой. Недостатком данного метода является зависимость от экспертного мнения.

Метод *последовательных уступок* позволяет найти оптимальное (компромиссное) решение в случае противоречивости критериев. Основная идея этого метода заключается в постепенном улучшении решения многокритериальной задачи путем последовательного снижения требований к одному из критериев. Для этого определяются начальные значения переменных и целевых функций. Далее выбирается критерий по степени важности. Находится оптимальное решение, максимизирующее (или минимизирующее) значение выбранного критерия. Происходит оценка результата. Рассчитываются значения остальных критериев для полученного оптимального решения. Определяются допустимые пределы изменения выбранных критериев, при которых сохраняется приемлемое качество решения. Уменьшается требование к оптимизированному критерию, чтобы улучшить значение одного из оставшихся критериев. Если достигнуто оптимальное решение или исчерпаны возможности улучшения, процесс останавливается. Однако эффективность метода последовательных уступок зависит от грамотного выбора порядка рассмотрения критериев и способности оценивать последствия изменений каждого шага.

С помощью совокупности рассмотренных методов многокритериальной оптимизации осуществлялся процесс одновременной оптимизации конфликтующих целевых функций в заданной области определения.

Разработанный алгоритм нашел свое применение при разработке информационной системы с использованием БД. Основные задачи ИС: моделирование процесса комплектации ТО, многокритериальный анализ данных, выбор наилучшего результата с учетом критериев и ограничений. Преимуществом такой ИС является наглядное представление данных, автоматическое заполнение документов, широкие возможности при обработке данных [10].

Даталогическая модель данных для программы моделирования комплектации технического оборудования в подвижных средствах восстановления ВВТ ВДВ [1,4] представлена на рисунке 2.

Для решения проблемы принятия решений использовались следующие методы для выбора вариантов решений:

– *AHP* (Analytic Hierarchy Process)– метод принятия решений, применяемый в ситуациях многокритериального выбора, в основе которого лежит обработка аналитических иерархий, использовался для систематизации элементов и выявления оптимального решения;

– *ANP* (Analytic Network Process)– на основании матриц парных сравнений рассчитывалось доминирование отдельных элементов внутри каждого кластера наборов инструментов ТО;

– *TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*)*, с помощью этого метода осуществлялось определение расстояния каждого набора ТО от идеального и базового решений. В качестве исходных данных выбирались веса критериев и кардинальная оценка полученных наборов ТО по отдельным критериям;

– *C4.5*–метод построения деревьев решений в интеллектуальной обработке данных. С его помощью было произведено генерирование правил классификации ТО.

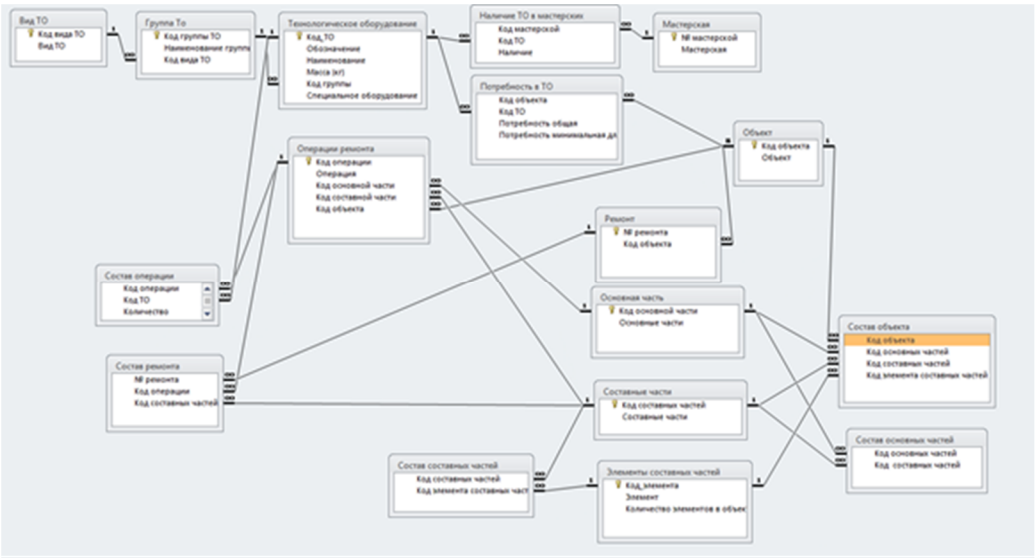


Рисунок 2 – Даталогическая модель данных
Figure 2 – Datalogical data model

На рисунках 3, 4 приведены примеры диаграмм, сформированные по результатам применения методов оптимизации ТО, которые позволили получить быстрый и точный ответ на запрос пользователя [6].

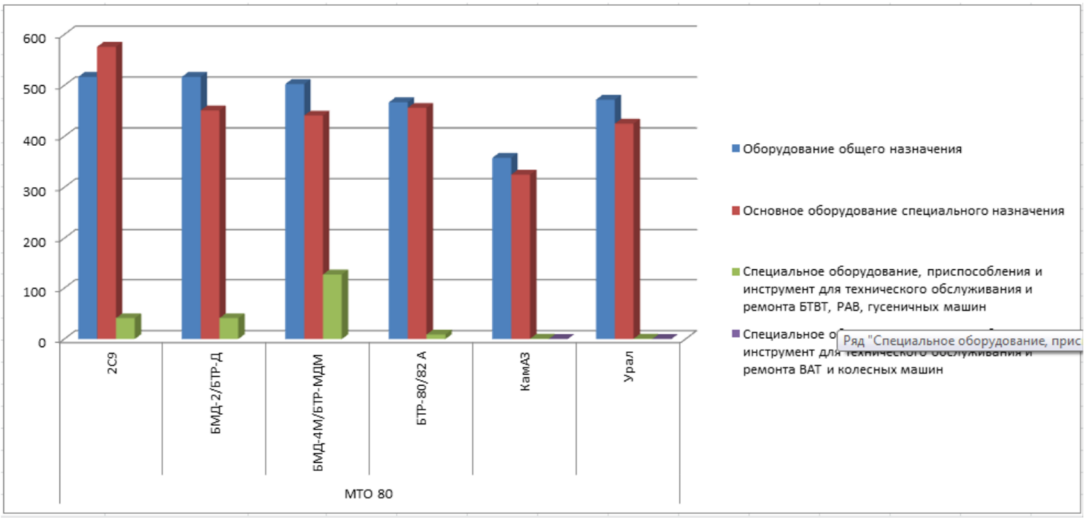
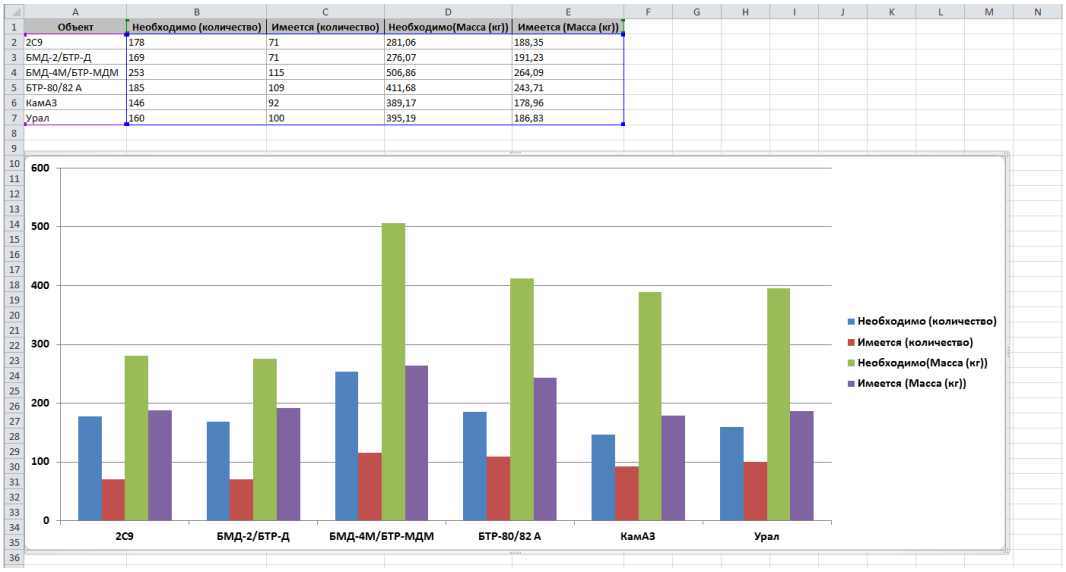


Рисунок 3 – Диаграмма показателей избыточности ТО
Figure 3 – Redundant technical equipment indicators diagram

Таким образом, в процессе разработки модели формирования специального комплекта оборудования для технической системы проведена систематизация и классификация ТО из эксплуатационной и ремонтной документации, построена математическая модель процесса формирования состава комплекта оборудования, определены основные критерии – минимизация затрат на его эксплуатацию. На основании выбранного критерия сформированы целевые функции, отображающие связь между критерием и параметрами модели, заданы ограни-

чения, подобран метод решения поставленной задачи ПР, сформирована БД и программный интерфейс [6] с использованием методов многокритериальной оптимизации.



Объект	Необходимо (количество)	Имеется (количество)	Необходимо(Масса (кг))	Имеется (Масса (кг))
2С9	178	71	281,06	188,35
БМД-2/БТР-Д	169	71	276,07	191,23
БМД-4М/БТР-МДМ	253	115	506,86	264,09
БТР-80/82 А	185	109	411,68	243,71
КамАЗ	146	92	389,17	178,96
Урал	160	100	395,19	186,83

Рисунок 4 – Диаграмма необходимых и достаточных показателей ТО
Figure 4 – Necessary and sufficient technical equipment indicators diagram

Выводы

Подводя итог вышесказанному, можно заключить следующее: в ходе проведенного теоретического исследования было проведено обоснование необходимости разработки модели процесса формирования специального комплекта оборудования для технической системы с использованием многокритериальной оптимизации. Результатом экспериментальных исследований стала разработанная модель специального комплекта оборудования для технической системы, которая позволила систематизировать и классифицировать ТО из эксплуатационной и ремонтной документации. Математическая модель процесса формирования универсального комплекта оборудования использовала основные критерии по минимизации затрат на его эксплуатацию. На основании выбранного критерия сформированы целевые функции, отображающие связь между критерием и параметрами модели. При помощи ограничений были выбраны методы оптимизации для решения поставленной задачи ПР. Разработанная БД и программный интерфейс позволили получать быстрый и точный результат по запросу пользователя с использованием методов многокритериальной оптимизации.

Отличительной особенностью полученной модели от ранее изученных является *комплексный* учет потребности в техническом обеспечении процессов войскового ремонта ВВТ с применением метода исключения дублирования инструмента без уменьшения его ремонтно-восстановительных работ. Разработана модель многокритериальной задачи принятия решений с использованием алгоритма построения комплекта ТО, проанализированы основные методы многокритериальной оптимизации, обоснован их выбор.

Практическим результатом выполненной разработки модели стала информационная система, которая автоматизирует моделирование процесса формирования уникального множества технических инструментов с использованием методов многокритериальной оптимизации. Прикладным результатом исследования является методика уточненного научно-обоснованного методического аппарата (инструментария), позволяющего осуществлять корректировку состава технической системы для универсальной мастерской ВДВ.

На основе полученной модели в дальнейшем будет реализована система поддержки принятия решений для поиска рационального результата с использованием методов многокритериальной оптимизации.

Библиографический список

1. **Щенёва Ю.Б., Гавзов В.В., Щенёв Е.С., Арешин Г.В.** Программный алгоритм моделирования комплектации технологического оборудования в подвижных мастерских // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула, 2021. № 5. С. 309-316.

2. **Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н., Щенёв Е.С., Бодров О.А.** Модель освоения образовательных компетенций с использованием инструментария интеллектуального анализа данных // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 119-132.

3. **Военная доктрина Российской Федерации**: утверждена Президентом Российской Федерации // Российская газета. – 2014. № 6570 (298). С. 1-3.

4. **База данных** для программ моделирования комплектации технологического оборудования в подвижных средствах восстановления вооружения и военной техники Воздушно-десантных войск [Текст]: Свидетельство о гос. регистрации базы данных 2020621425 Рос. Федерация / Гавзов В.В., Щенёва Ю.Б. [и др.]; Правообладатель РВВДКУ (RU); заявл. 2020621309 04.08.2020; опубл. 13.08.2020, Бюл. № 8 – 1 с.

5. **Рыжкович В.П.** Обоснование направлений развития подвижных ремонтных мастерских вооружения и военной техники воздушно-десантных войск / В.П. Рыжкович, В.В. Гавзов, М.А. Савельев, М.Д. Симаньков: Военная Мысль. № 4. 2021. С. 80-92.

6. **Программа** моделирования рационального комплекта технологического оборудования для вооружения и военной техники Воздушно-десантных войск в подвижных мастерских технического обслуживания и ремонта. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020662864 Рос. Федерация / Гавзов В.В., Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С. [и др.]; Правообладатель РВВДКУ (RU); заявл. № 2020662241 13.10.2020; опубл. 20.10.2020, Бюл. № 10 – 1 с.

7. **Демидова Л.А.** Разработка двухуровневого классификатора сложноорганизованных многомерных данных больших объемов / Л.А. Демидова, Ю.С. Соколова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С. 71-82.

8. **Демидова Л.А.** Разработка ансамбля алгоритмов кластеризации на основе матриц подобия меток кластеров и алгоритма спектральной факторизации / Л.А. Демидова, Р.В. Тишкин, А.А. Юдаков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 46. С. 9-17.

9. **Майков К.А.** Алгебраические особенности композиции алгоритмов вычисления фрактальных структур/ К.А. Майков, А.Н. Пылькин, С.Н. Кузьменко, А.А. Теплов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 76. С. 117-127.

10. **Щенёва Ю.Б.** Алгоритм многокритериального анализа данных для систем поддержки принятия решений. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 92. С. 203-213.

UDC 004.65

MODEL OF FORMING SPECIAL EQUIPMENT SET PROCESS FOR TECHNICAL SYSTEM USING MULTICRITERIA OPTIMIZATION

Yu. B. Shcheneva, lecturer, CAM department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-6351-0399, e-mail: Shenyova@yandex.ru
A. N. Pylkin, Dr. in technical sciences, full professor, CAM department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-9925-2870, e-mail:pylkin.a.n@rsreu.ru
K. A. Maikov, Dr. in technical sciences, full professor, Informatics and control systems Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0003-1864-2397, e-mail: maikov@bmstu.ru
Ye. S. Shchenev, postgraduate student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/ 0009-0005-8438-7445, e-mail:Jheka1235317@gmail.com

The task building special equipment set forming process model for a technical system using multicriteria optimization methods is considered. ***The aim of the article*** *is to develop special equipment set model for technical system which will serve as the basis for implementing a decision support system to find a ra-*

tional solution using multi-criteria optimization methods. An optimization model of the special equipment set forming process for a technical system is proposed. The main criteria for multi-criteria optimization are defined. Based on these criteria target functions are formulated and constraints on the model are set. Rational methods of multi-criteria optimization are selected. A distinctive feature of the obtained results is the use of universal criterion being the primary one to select the rational composition of a specialized set of technical equipment that enables successful multi-criteria data optimization in decision support systems. The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed model to construct a decision support system for various fields of knowledge, particularly engineering one. The novelty of the work lies in the automation of decision-making process using multi-criteria optimization methods.

Keywords: *multi-criteria optimization, multi-criteria data analysis, decision support systems, mathematical model, technical system, special equipment set, information system.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-130-142

References

1. **Shchenyova Yu.B., Gavzov V.V., Shchenyov E.S., Areshin G.V.** Software Algorithm for Modeling the Configuration of Technological Equipment in Mobile Workshops. *Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences*. Tula. 2021, no. 5, pp. 309-316.

2. **Shchenyova Yu.B., Pylkin A.N., Shchenyov E.S., Bodrov O.A.** Model of Mastering Educational Competencies Using Data Mining Tools. *Vestnik of Ryazan state radioengineering university*. 2023, no. 84, pp. 119-132.

3. **Military Doctrine of the Russian Federation:** Approved by the President of the Russian Federation. *Rossiyskaya Gazeta*. 2014, no. 6570 (298), pp. 1-3.

4. **Database for modeling the configuration of technological equipment in mobile means of restoring weapons and military equipment of the Airborne Troops** [Text]: Certificate of State Registration of the Database 2020621425 Ros. Federation / Gavzov V.V., Shchenyova Yu.B. [et al.]; Rightholder RVDDKU (RU); application 2020621309, 04.08.2020; published 13.08.2020, Bulletin no. 8, 1 p.

5. **Ryzhkovich V.P.** Justification of the Directions for the Development of Mobile Repair Facilities for Weapons and Military Equipment of the Airborne Troops / V.P. Ryzhkovich, V.V. Gavzov, M.A. Savelyev, and M.D. Simankov: *Military Thought*. 2021, no. 4, pp. 80-92.

6. **Program for modeling a rational set of technological equipment for the weapons and military equipment of the Airborne Troops in mobile maintenance and repair workshops**. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2020662864 Ros. Federation / Gavzov V.V., Shchenyova Yu.B., Shchenyov E.S. [et al.]; Rightholder RVDDKU (RU); application No. 2020662241, 13.10.2020; published 20.10.2020. Bulletin no. 10, 1 p.

7. **Demidova L.A.** Development of complex multidimensional large-volume data two-level classifier / L.A. Demidova, Y.S. Sokolova. *Vestnik of Ryazan state radioengineering university*. 2016, no 56, pp. 71-82.

8. **Demidova, L.A.** Development of clustering algorithms ensemble based on similarity matrices of cluster labels and spectral factorization algorithm / L.A. Demidova, R.V. Tishkin, A.A. Yudakov. *Vestnik of Ryazan state radioengineering university*. 2013, no. 46, pp. 9-17.

9. **Maikov K.A.** Algebraic features of algorithms composition for calculating fractal structures / K.A. Maikov, A.N. Pylkin, S.N. Kuzmenko, A.A. Teplov. *Vestnik of Ryazan state radioengineering university*. 2020, no. 76, pp. 117-127.

10. **Shcheneva Y.B.** Multi-criteria data analysis algorithm for decision support systems. *Vestnik of Ryazan state radioengineering university*. 2025, no 92, pp. 203-213.