

А.А. Пьянков, кандидат технических наук, доцент

Многокритериальный выбор оптимального варианта развития системы вооружения с использованием метода комплексной оценки¹

Рассмотрены задачи многокритериального выбора оптимальных решений при обосновании программ и планов развития ВВТ с использованием метода комплексной оценки. Получен алгоритм многоцелевого выбора на основе построения иерархии критериев и бинарных отношений предпочтений. Приведен пример, иллюстрирующий работоспособность предлагаемого метода на примере выбора оптимальной по стоимости программы развития системы вооружения при заданных значениях уровней оснащенности, исправности и современности.

В настоящее время управление развитием системой вооружения осуществляется на плановой основе посредством разработки и реализации программ и планов развития ВВТ. Согласно принятой методологии программное управление развитием ВВТ осуществляется в четыре основных этапа: обоснование, формирование, реализация и контроль хода выполнения соответствующих программ и планов. На этапе обоснования программы развития системы вооружения решаются следующие основные задачи: формирование единой системы исходных данных, оценка технического состояния системы вооружения, генерация множества возможных вариантов и выбор из них рационального, который и будет являться основой для принятия решения [1].

Наиболее сложным с научной точки зрения является процесс выбора рационального (оптимального относительно выбранного критерия) варианта развития системы вооружения. Основным критерием выбора такого варианта традиционно является «эффективность – стоимость» [2]. В качестве частных показателей эффективности системы вооружения в настоящее время принято рассматривать показатели [3, 4]:

- коэффициент оснащенности K_o воинских формирований ВВТ относительно штатной численности:

$$K_o = \frac{N_{нал}}{N_{шт}}; \quad (1)$$

- коэффициент исправности K_u , характеризующий долю исправного ВВТ в составе воинских формирований:

$$K_u = \frac{N_{исп}}{N_{нал}}; \quad (2)$$

- коэффициент современности K_c , характеризующий долю современного и перспективного ВВТ в составе воинских формирований:

$$K_c = \frac{N_{сов}}{N_{нал}}, \quad (3)$$

где $N_{шт}$ – штатная численность образцов ВВТ;
 $N_{нал}$ – фактическая численность образцов ВВТ;

$N_{исп}$ – фактическое количество исправных образцов ВВТ;

$N_{сов}$ – фактическое количество современных образцов ВВТ.

В качестве стоимостного показателя выступают суммарные затраты C_Σ на реализацию программных мероприятий.

В рамках классической задачи оптимизации требуется сформировать вариант развития системы вооружения, обеспечивающий выполнение нормативных требований по оснащенности, исправности и современности

¹ Статья подготовлена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-359.2013.10.

к концу программного периода при минимизации суммарных затрат на реализацию программ и планов развития ВВТ. В случае, когда задан лимит ассигнований, выделяемых на развитие системы вооружения, в качестве критерия оптимизации может быть выбран максимум современности при фиксированных значениях показателей оснащенности и исправности. Такие задачи относятся к классу однокритериальных задач линейного программирования и решаются с использованием известных математических методов [5, 6].

Однако стремление учесть большое количество факторов в задачах обоснования развития системы вооружения делает их сложными и многоаспектными. В этих случаях необходимо решать многокритериальные задачи, в которых поиск оптимального решения осуществляется по многоцелевому критерию. В настоящее время существуют различные подходы к решению такого рода задач, однако одним из самых эффективных в практике управления развитием системы вооружения является метод последовательного сужения множества Парето [7, 8, 9]. Данный метод обеспечивает многоцелевой выбор из большого множества альтернатив ограниченное множество парето-оптимальных вариантов развития системы вооружения.

В соответствии с методом Парето вариант развития системы вооружения U' считается доминирующим (предпочтительным) над вариантом U по вектору показателей $F(U) = (f_1(U), f_2(U), \dots, f_m(U))$, если выполняются следующие неравенства:

$$\begin{aligned} f_1(U') &\geq f_1(U), \\ f_2(U') &\geq f_2(U), \\ f_m(U') &\geq f_m(U). \end{aligned}$$

При этом хотя бы одно из неравенств должно быть строгим. В случае рассматриваемого векторного критерия

$$F(U) = (K_o(U), K_c(U), K_u(U), \dots, C_\Sigma(U)),$$

должны выполняться следующие неравенства:

$$\begin{aligned} K_o(U') &\geq K_o(U); K_c(U') \geq K_c(U); \\ K_u(U') &\geq K_u(U); C_\Sigma(U') \leq C_\Sigma(U). \end{aligned} \quad (4)$$

Два варианта U' и U являются не доминируемыми и не доминирующими, т.е. несравнимыми между собой, если для целевых показателей вектора $F(U)$ и $F(U')$ выполняются неравенства одинакового знака (\geq или \leq). Множество несравнимых (компромиссных) вариантов называется парето-оптимальным решением в задаче многокритериального выбора [10]. Таким образом, идея метода заключается в последовательном исключении из исходного множества вариантов доминируемых решений по выбранному критерию.

Основным недостатком метода последовательного сужения множества Парето является то, что в результате можно получить достаточно большое количество парето-оптимальных вариантов. И в этом случае для выбора одного-единственного решения необходимо вводить дополнительные критерии.

В последнее время большую популярность получил метод выбора оптимального варианта путем формирования комплексной оценки на основе построения иерархической структуры (дерева) критериев [11, 12]. Идея метода состоит в том, что все критерии организуются в определенную иерархическую структуру. На каждом уровне этой структуры происходит построение агрегированной оценки критериев предыдущего уровня. На рисунке 1 приводится иерархическая структура для трех критериев оценки системы вооружения – уровня оснащенности группировки войск, уровня исправности и уровня современности ВВТ.

Представляется естественным сначала объединить показатели, характеризующие количественную составляющую критерия – уровень оснащенности группировки войск (**O**) и уровень исправности ВВТ (**И**), в один агрегированный показатель оснащенности исправным ВВТ (**OИ**). Далее, объединяя **OИ** и уровень современности ВВТ (**C**), получим комплексную оценку варианта развития системы вооружения. Особенностью иерархической структуры является агрегирование в каждом узле дере-

ва только двух оценок. Это обусловлено способностью человека эффективно оценивать только ограниченное число целей и лучше всего, если на каждом шаге оценки прихо-

дится сравнивать не более двух критериев. Такое сравнение в случае двух критериев удобно проводить, представляя результаты в виде таблицы (матрицы).

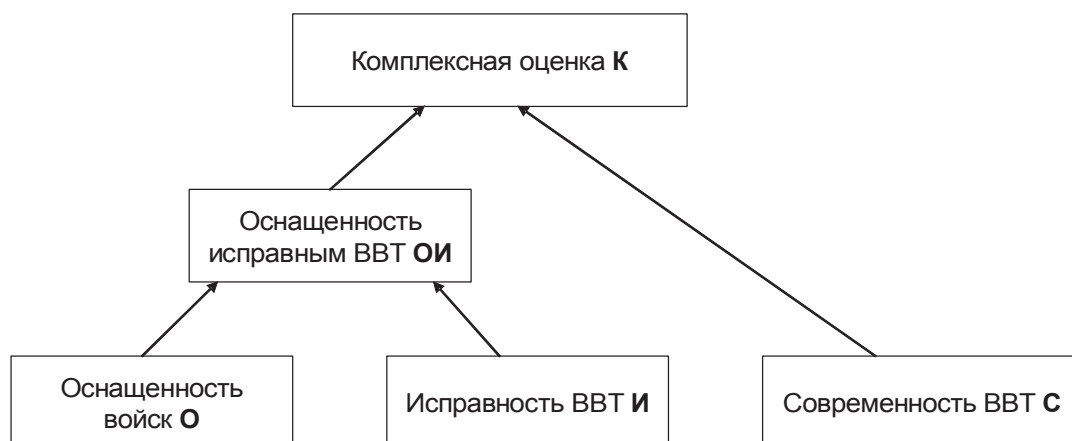


Рисунок 1 – Иерархическая структура критериев оценки варианта развития системы вооружения

В интересах снижения количества оценок по каждому из критериев целесообразно предварительно перейти к их дискретной шкале [2]. Например, будем оценивать состояние системы вооружения по каждому показателю по четырехбалльной шкале – неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошо, от-

лично, или в числовых оценках – один, два, три, четыре (таблица 1). В таких же шкалах будем оценивать агрегированную и комплексную оценки. На рисунке 2 приведен пример свертки показателей, характеризующих уровни оснащенности и исправности ВВТ.

Таблица 1 – Соответствие абсолютных и относительных оценок для различных показателей

Баллы	1	2	3	4
Оснащенность	60%	80%	90%	100%
Исправность	60%	70%	80%	100%
Современность	30%	50%	70%	100%

Полученная матрица отражает приоритеты развития системы вооружения. Так, при низком показателе оснащенности общая оценка не может быть выше «удовлетворительно», даже при наличии отличной оценки по показателю исправности. В то же время с ростом уровня оснащенности приоритет смещается в сторону показателя исправности, поскольку состояние «отлично» возможно только при оценке «отлично» по показателю исправность (при этом, возможна оценка «хорошо» по оснащенности).

Имея оценку уровня оснащенности исправным ВВТ, можно построить матрицу свертки для комплексной оценки системы вооружения. Пример такой оценки приведен на рисунке 3, где также можно заметить изменение системы приоритетов. При кризисном положении в системе вооружения приоритет имеют оба показателя: оснащенность исправным ВВТ и современность. При высоких оценках этих показателей приоритет смещается в сторону современности образцов ВВТ.

90-100%	4	2	3	3	4
80-90%	3	2	2	3	4
70-80%	2	1	2	2	3
0-60%	1	1	1	1	2
О / И	1	2	3	4	
		0-60%	60-70%	70-80%	80-100%

Рисунок 2 – Свертка показателей «оснащенности» и «исправности»

4	2	2	3	4
3	2	2	3	4
2	1	2	2	3
1	1	1	2	2
ОИ / С	1	2	3	4
	0%-30%	30-50%	50-70%	70-100%

Рисунок 3 – Свертка показателей «оснащенности исправным ВВТ» и «современности»

Обе матрицы, объединенные в графическую схему формирования комплексной оценки системы вооружения, приведены на рисунке 4. Имея дерево свертки критериев можно оценивать любой вариант развития системы вооружения и на основе этого выбирать оптимальный вариант. Рассмотрим задачу выбора варианта развития системы вооружения, обеспечивающего переход от состояния «неудовлетворительно» к состоянию «удовлетворительно». Для этого определим понятие напряженных вариантов. Каждый вариант будем описывать вектором $x=(x_0, x_u, x_c)$, компоненты которого определяют оценки по соответствующим критериям.

Вариант x называется напряженным, если не существует другого варианта y , имеющего то же значение комплексной оценки, у которого

оценки по всем критериям не выше, чем у варианта x [2]. Так, вариант $x=(2, 2, 3)$, имеющий комплексную оценку $K=2$, не является напряженным, так как имеется вариант $y=(2, 2, 2)$, имеющий такое же значение комплексной оценки и в то же время его оценки по критериям не превышают оценок варианта x . Для варианта $y=(2, 2, 2)$ таких вариантов не существует. Поэтому он является напряженным.

Смысл напряженных вариантов в том, что варианты развития системы вооружения, обеспечивающие получение требуемого значения комплексной оценки с минимальными затратами, должны быть напряженными. Фактически напряженные варианты это и есть парето-оптимальные варианты в пространстве критериев [10]. Таким образом, можно ограничиться рассмотрением только напряженных вариантов.

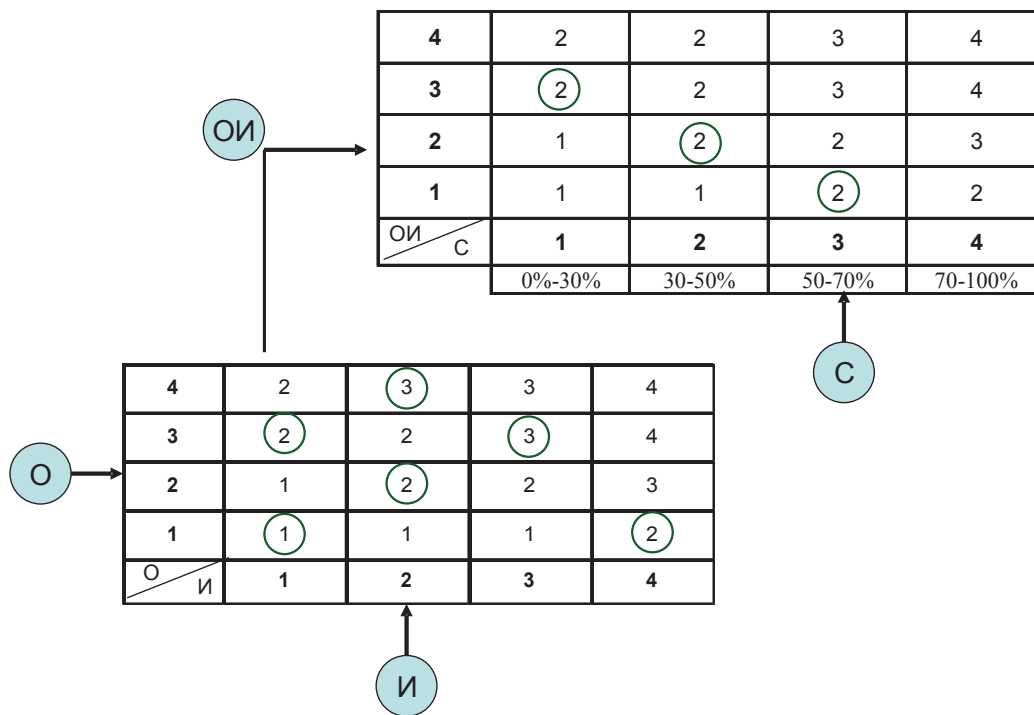


Рисунок 4 – Графическая схема формирования комплексной оценки системы вооружения

Далее рассмотрен алгоритм построения всех напряженных вариантов при решении задачи перехода из состояния $x_0=(1,1,1)$ с комплексной оценкой «неудовлетворительно» в состояние с комплексной оценкой «удовлетворительно». В матрице сверток показателей «оснащенность исправным ВВТ» и «современность» отмечаем все элементы матрицы, имеющие оценку 2 и являющиеся напряженными. Имеем три таких элемента: (3; 1), (2; 2) и (1; 3). Для получения каждого из указанных состояний необходимо достичь соответствующих значений по показателям «ОИ» и «С». Например, состояние (1; 3) достигается при достижении оценки 1 по показателю «ОИ» и оценки 3 по показателю «С».

Показатель уровня современности ВВТ является исходным, тогда как показатель оснащенности исправным ВВТ является агрегированным показателем. Поэтому на основе матрицы свертки показателей «О» и «И» необходимо указать все напряженные варианты, которые дают соответствующие оценки по показателю «ОИ». Так, например, оценка «удовлетворительно» (2) по показателю «О»

может быть получена тремя способами: (3; 1), (2; 2) и (1, 4), оценка 3 – двумя способами: (4; 2) и (3; 3), оценка 1 – всего одним способом: (1; 1). Это соответствует сохранению существующего положения в области развития системы вооружения.

На рисунке 5 отображен полученный граф, который называется сетью напряженных вариантов. Как следует из алгоритма его построения, он содержит все напряженные варианты, имеющие комплексную оценку «удовлетворительно». Имея сеть напряженных вариантов, нетрудно определить число напряженных вариантов, обеспечивающих получение требуемой оценки. Для этого применяется следующий алгоритм индексации (пометки) вершин сети [11].

На первом шаге помечаются конечные вершины сети индексами 1 (индексы указаны в верхней половине вершины). На втором шаге, двигаясь снизу вверх, последовательно помечаются все вершины. Индекс вершины-кружка равен произведению индексов смежных двух вершин нижнего уровня. Индекс вершины-квадрата не равен сумме индексов смежных с ней вершин нижнего уровня.

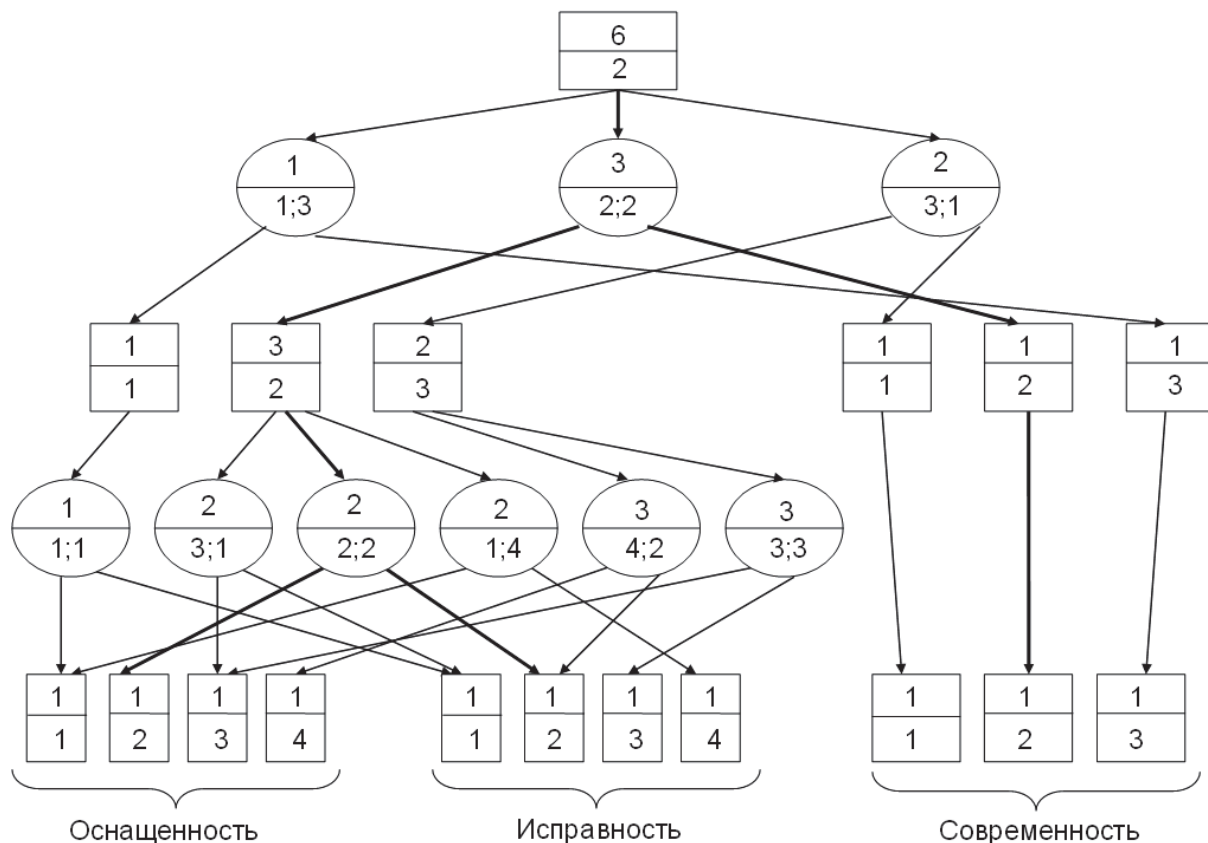


Рисунок 5 – Сеть напряженных вариантов

Индекс начальной вершины-квадрата определяет число напряженных вариантов. В рассматриваемом примере число напряженных вариантов равно 6. Толстыми линиями обозначен один из напряженных вариантов.

Построив сеть напряженных вариантов, можно решать различные задачи формирования программы развития системы вооружения с учетом их стоимости. Рассмотрим задачу выбора варианта, обеспечивающего достижение поставленной цели с минимальными затратами. Пусть для каждого критерия i определены затраты S_{ij} , необходимые для обеспечения уровня j , то есть группа программных мероприятий, выполнение которых обеспечивает рост критерия до уровня j . При этом необходимо учитывать, что реализация какого-либо программного мероприятия обеспечивает изменение значений показателей по различным критериям. Например, закупка нового образца ВВТ обеспечивает

одновременный рост уровня оснащенности, исправности и современности. Соответственно существует определенная зависимость между данными показателями. Поэтому затраты S_{ij} также будут зависеть от критериев $z <> i$.

В таблице 2 отображены затраты S_{ij} для сети напряженных вариантов, отображенных на рисунке 4. Из таблицы видно, что, например, затраты, необходимые для обеспечения уровня 3 по критерию исправности, растут в зависимости от возрастания уровня оснащенности. Это обусловлено тем, что согласно формуле (1) рост показателя оснащенности достигается за счет увеличения количества образцов ВВТ, находящегося в наличии. Соответственно, для достижения заданного уровня исправности при большем количестве образцов ВВТ, находящихся в наличии, согласно (2) требуется больше мероприятий по ремонту этого ВВТ, а соответственно и затраты будут выше.

Таблица 2 – Таблица затрат, необходимых для обеспечения различных уровней по показателям оснащенности, исправности и современности

		1	2	3	4
Оснащенность		15	20	23	25
O = 1	Исправность	4	5	6	7
	Современность	5	10	15	18
O = 2	Исправность	5	6	6	8
	Современность	7	12	17	24
O = 3	Исправность	5	6	7	9
	Современность	8	14	19	27
O = 4	Исправность	6	7	8	10
	Современность	9	15	21	30

В основе алгоритма определения варианта программы минимальной стоимости лежит метод индексации вершин сети напряженных вариантов снизу вверх. На первом шаге помечаются нижние вершины сети индексами S_{ij} . Далее вершины следующего (более высокого) уровня сети напряженных вариантов помечаются только после того, как помечены все смежные вершины нижележащего уровня. При этом индекс вершины-квадрата равен минимальному из индексов смежных вершин-кружков нижележащего уровня, а индекс вершины-кружка (в кружке записаны два числа – это пара оценок критериев нижнего уровня, агрегирование которых дает соответствующую оценку критерия верхнего уровня) равен сумме индексов смежных вершин-квадратов нижележащего уровня.

При описанной процедуре индекс начальной вершины-квадрата равен минимальным затратам на реализацию соответствующей программы. Оптимальный вариант находится «обратным ходом» – сверху вниз. Сначала находится вершина-кружок, смежная с начальной вершиной сети и имеющая минимальный индекс среди всех вершин, смежных с начальной. Из этой вершины-кружка исходят две дуги к вершинам-квадратам нижележащего уровня. Для каждой вершины-квадрата нахо-

дится вершина-кружок, имеющая минимальный индекс среди всех вершин, смежных с соответствующей вершиной-квадратом и т.д. В результате будет выделен подграф, определяющий оптимальный вариант программы.

На рисунке 6 представлен результат работы алгоритма по выбору оптимального варианта развития системы вооружения. Оптимальный вариант выделен толстыми линиями. Это вариант (1; 4; 2) с затратами $S=32$.

Таким образом, для осуществления перехода из состояния $x_0=(1,1,1)$ с комплексной оценкой «неудовлетворительно» в состояние с комплексной оценкой «удовлетворительно» оптимальным по стоимости будет являться вариант, в котором акцент смещен в сторону ремонта существующего ВВТ и незначительную закупку нового ВВТ. Таким образом, можно определять оптимальные варианты программ и планов развития системы вооружения в условиях зависимости критериев между собой.

Следует отметить, что представленный метод комплексного оценивания различных вариантов и выбор из них оптимального с использованием иерархии критериев напоминает метод анализа иерархии Саати (МАИ) [13].

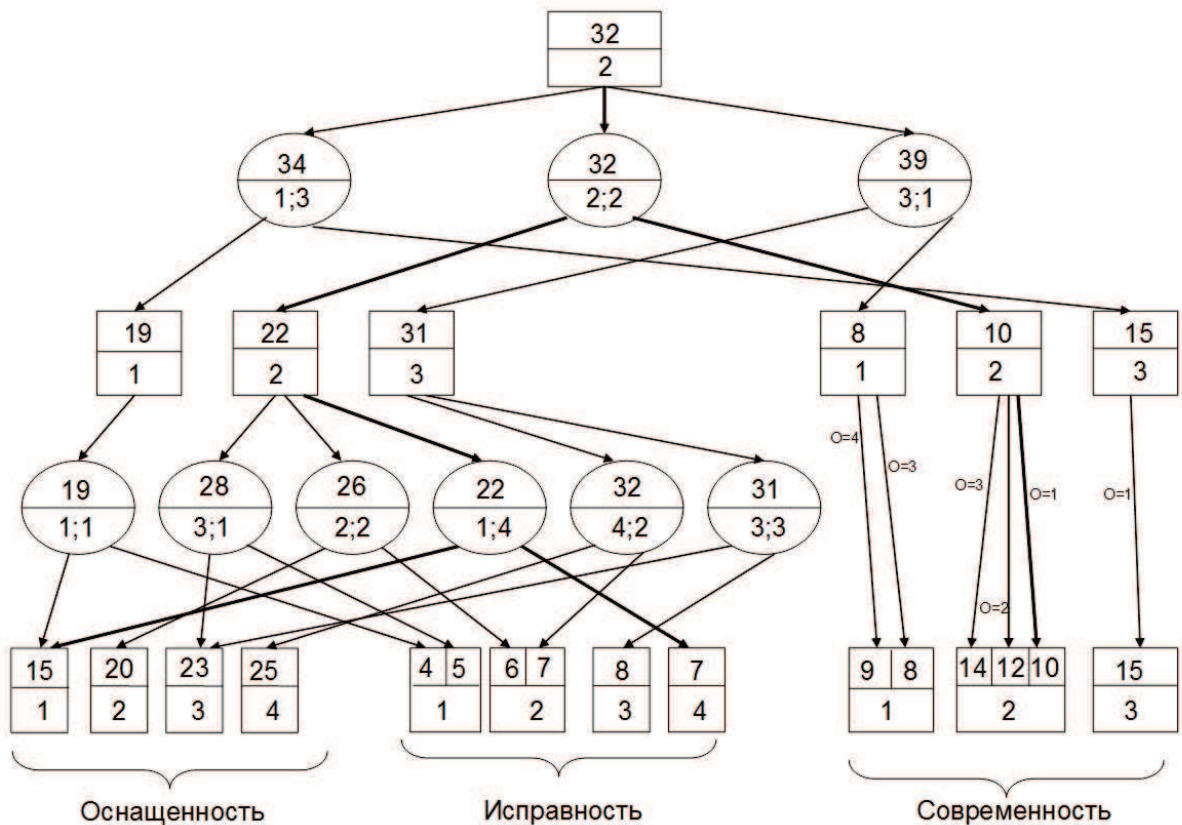


Рисунок 6 – Схема выбора оптимального варианта программы

Основным отличием этих двух методов является то, что одним из условий применения метода Саати является транзитивность предпочтений. Это требование означает, что если критерий X предпочтительней критерия Y , который в свою очередь предпочтительней критерия Z , то в любом случае критерий X предпочтительней критерия Z . Такое требование легко выполняется, когда суждения о предпочтении одного критерия другому четко выражены в числовом выражении. В этом случае в результате применения метода МАИ можно точно сказать насколько один вариант является предпочтительней другого.

Однако в практике управления развитием системы вооружения не всегда удастся оценить рассматриваемые параметры в единой числовой шкале. В этом случае используют лингвистическую шкалу предпочтений. К таким показателям относятся, например, уровень решения задачи определенной подсистемой системы вооружения ВС РФ, масштаб военных конфликтов, уровень проработанно-

сти научно-методического обеспечения и др. В этих условиях можно говорить о наличии слабой транзитивности предпочтений. В этом случае является эффективным предлагаемый метод многокритериального выбора на основе бинарных отношений.

В приведенном примере рассмотрена иерархическая система показателей, характеризующих уровни оснащённости, исправности и современности системы вооружения ВС РФ в целом. В случае, когда значения этих показателей различны для различных подсистем, входящих в систему вооружения ВС РФ, для оценки варианта развития системы вооружения целесообразно рассмотреть иерархию подсистем системы вооружения РФ (рисунок 7). Каждый узел при этом характеризуется уровнем решения задачи соответствующей подсистемой. При этом показатели, характеризующие уровни решения задач различных подсистем, находятся в слабой зависимости между собой.



Рисунок 7 – Пример иерархии критериев, характеризующих уровни решаемых задач различными подсистемами системы вооружения ВС РФ

Таким образом, использование метода многокритериального выбора на основе бинарных отношений позволяет снизить трудовые и временные затраты на рассмотрение множества возможных альтернатив и выбрать из них оптимальное решение. Предложенный

метод целесообразно использовать НИО Минобороны России и ОВУ в практике управления развитием системы вооружения на этапе обоснования государственной программы вооружения и государственного оборонного заказа.

Список использованных источников

1. Буренок В.М., Ляпунов В.М., Мудров В.И. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения / Под ред. А.М.Московского. – М.: Вооружение. Политика. Конверсия, 2005. – 418 с.
2. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе / Под ред. В.М.Буренка. – М.: Граница, 2013. – 520 с.
3. Методические материалы для подготовки отчета о ходе выполнения Государственной программы вооружения 2011-2020 годы, утвержденные первым заместителем Министра обороны РФ 12 марта 2012 года.
4. Буравлев А.И., Гладышевский В.Л., Пьянков А.А. Существующие методы мониторинга реализации государственной программы вооружения и направления их совершенствования / Материалы Седьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2013)», 30 сент. – 2 окт. 2013 г., Москва. – М.: ИПУ РАН, 2013. – Т.2. – 445 с.
5. Салманов О.Н. Математическая экономика с применением Mathcad и Excel. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
6. Беллман Р., Калаба А. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1969. – 41 с.
7. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Метод выбора парето-оптимальных вариантов государственной программы вооружения // Вооружение и экономика. – 2012. – № 1(17).

8. Пьянков А.А. Использование методов многокритериального выбора в задачах программно-целевого планирования // Вооружение и экономика. – 2013. – № 2(22).

9. Пьянков А.А. Многокритериальная оптимизация в задачах проектирования логистических систем // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2013. – № 3.

10. Ногин В.Д. Принятие решения в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФизматИсТ, 2005. – С. 151-155.

11. Андроникова Н.Г., Баркалов С.А., Бурков В.Н., Котенко А.М. Модели и методы оптимизации региональных программ развития. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 60 с.

12. Бурков В.Н., Буркова И.В. Инновации в управлении – программно-целевой подход / Материалы Седьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2013)», 30 сент. – 2 окт. 2013 г., Москва. – М.: ИПУ РАН, 2013. – Т.2. – 445 с.

13. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993.