



Центр стратегических оценок и прогнозов

[www.csef.ru](http://www.csef.ru)

**Фомин А.Н.**

# **Интегральный показатель качества и формализация процедуры синтеза программы вооружения**

**Аналитический доклад**

Москва - 2012

## Содержание

|                                                                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>                                                                                                                        | <b>3</b>  |
| <b>1. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ НОВЫМИ КОМПЛЕКСАМИ<br/>(ОБРАЗЦАМИ) ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ .....</b>                          | <b>4</b>  |
| <b>2. ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ОДНОГО ТИПА<br/>ВООРУЖЕНИЯ.....</b>                                                             | <b>14</b> |
| <b>3. ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ПРОГРАММЫ ВООРУЖЕНИЯ. ФОРМАЛИЗАЦИЯ<br/>ЗАДАЧИ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОГРАММЫ<br/>ВООРУЖЕНИЯ.....</b> | <b>24</b> |
| <b>4. МЕТОДЫ ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ (АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ) .....</b>                                                                                   | <b>36</b> |
| <b>ВЫВОДЫ.....</b>                                                                                                                           | <b>49</b> |

## Введение

В настоящем докладе рассматриваются основные задачи, возлагаемые на Программу вооружения, а также возможные способы их решения заказывающими управлениями Министерства обороны в различных экономических условиях.

При попытке формализации этих задач мы придем к новому важному понятию — **интегральному показателю качества Программы вооружения**, который позволит достаточно однозначно и корректно сравнить между собой различные предлагаемые варианты Программ вооружения и оценить возможность их практической реализации.

Мы увидим, что этот показатель зависит от группы параметров, которые могут независимо варьироваться в некоторых пределах. Конкретные значения этих свободных параметров целесообразно установить для получения максимального эффекта от реализации Программы вооружения. Таким образом, приходим к идее о возможности управления разработкой Программы вооружения, ее синтезе и существовании особой оптимизирующей процедуры для осуществления этого процесса.

Используя показатель качества как целевую функцию, в конце раздела мы сформулируем указанную задачу синтеза Программы вооружения как задачу математического программирования.

## 1. Способы обеспечения Вооруженных Сил новыми комплексами (образцами) вооружения и военной техники

В федеральную Программу разработки, создания и производства ВВТ на 10-летний период включаются заказы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, серийное производство, капитальное строительство, мероприятия по материально-техническому обеспечению этих работ, повышению мобилизационной подготовки, а также заказы на утилизацию выводимых из эксплуатации комплексов и образцов ВВТ.

Далее мы будем рассматривать все перечисленные направления работ за исключением последнего. Дело в том, что работы по утилизации ВВТ, как правило, не имеют непосредственной направленности на повышение боевых возможностей вооружения; это дополнительная задача, которую должен решить государственный заказчик, проводя соответствующие нормативные финансовые отчисления из общей суммы оборонного заказа.

Таким образом, в дальнейшем под Программой вооружения мы будем понимать *целостную систему мероприятий по организации и проведению НИОКР по оборонной тематике, серийному производству ВВТ, капитальному строительству, а также — по материально-техническому обеспечению и повышению мобилизационной подготовки.*

В зависимости от степени развития в стране оборонных отраслей промышленности и рыночных отношений могут существовать различные подходы к реализации Программы вооружения.

Действительно, предположим, что в стране существуют независимые в экономическом отношении фирмы, производящие разнообразную оборонную продукцию. Фирмы функционируют стабильно и устойчиво, поэтому государство может не беспокоиться о возможности их разрушения и потери ценных для обороны страны военных производств. В связи с этим, оно может не вникать во внутренние особенности хозяйственной деятельности и финансирования каждой фирмы. При таком идеально отлаженном экономическом механизме государственная задача инженерно-технического обеспечения Вооруженных Сил будет заключаться только в закупках вооружения у соответствующих фирм. Задачей заказывающих управлений Министерства обороны будет формирование такого рационального плана закупок ВВТ, который при фиксированном общем объеме ассигнований максимальным образом соответствовал бы принятым на государственном уровне целевым установкам.

Поэтому типичная задача, стоящая в этом случае перед заказывающими органами Министерства обороны, может быть сформулирована следующим образом.

Требуется определить такие количества  $\delta N_j$  ( $j=1...k$ ) закупаемых

различных комплексов (образцов) вооружения, которые при заданной величине  $C_0$  общих расходов обеспечили бы максимальное приращение обобщенного технического потенциала  $W$  ВВТ. В дальнейшем совокупность планируемых количеств закупаемых у фирм комплексов (образцов) вооружения будем называть планом закупок ВВТ.

Для формирования рационального плана закупок ВВТ военного ведомства приходим к следующей задаче математического программирования.

Определить:

$$W_0 = \max W(\delta N_1, \delta N_2, \dots, \delta N_{k-1}, \delta N_k)$$

при стоимостном ограничении-равенстве

$$C_1(\delta N_1) + C_2(\delta N_2) + \dots + C_{k-1}(\delta N_{k-1}) + C_k(\delta N_k) \leq C_0,$$

и совокупности ограничений-неравенств

$$\delta N_j \geq 0 \quad \forall j = 1 \dots k,$$

где  $C_j(\delta N_j)$  — затраты на приобретение  $\delta N_j$  комплексов (образцов)  $j$ -го типа ВВТ (в дальнейшем мы везде индексом  $j$  обозначать различные типы ВВТ).

В условиях развитой экономики, когда стране есть что терять при возможном военном конфликте, правительство обязано заботиться о поддержании должных уровня и темпов развития своих Вооруженных Сил. Поэтому  $N_j$  — обычно большие числа, а в поведении  $W$  проявляется известная закономерность убывающей по  $N_j$  полезности, т.е. функция  $W$  — вогнутая по всем аргументам. В этом случае появляется возможность следующим образом упростить исходную постановку задачи.

Будем считать, что  $N_j$  — это не целые числа, а более широкий класс действительных неотрицательных чисел, а  $W$  и  $C_j$  — непрерывные дифференцируемые функции своих, теперь уже непрерывно изменяющихся, аргументов  $\delta N_j$ , причем  $C_j(\delta N_j)$  — монотонно возрастающие функции  $\delta N_j$ .

В связи с последним замечанием можно произвести замену переменных в оптимизируемой функции  $W$ :  $\delta N_j \rightarrow C_j(\delta N_j)$ , и записать оптимизационную задачу в виде.

Определить:

$$W_0^* = \max W^*(C_1, C_2, \dots, C_{k-1}, C_k) \quad (1.1)$$

при линейном ограничении-равенстве

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_{k-1} + C_k \leq C_0, \quad (1.2)$$

и совокупности ограничений-неравенств

$$\delta N_j(C_j) \geq 0 \quad \forall j = 1 \dots k. \quad (1.3)$$

В (1.1)  $W^*(C_1, C_2, \dots, C_{k-1}, C_k)$  — исходная целевая функция, но теперь зависящая от новой совокупности аргументов  $C_j$ .

Если выполняется закономерность убывающей полезности, то функция  $W^*(C_1, C_2, \dots, C_{k-1}, C_k)$  — вогнутая. Тогда можно показать, что решение задачи (1.1)-(1.3), удовлетворяющее условиям  $\delta N_j \geq 0$ , реализуется при  $C = C_0$ .

Общий метод аналитического решения задач с ограничениями-равенствами, подобных (1.1)-(1.3), хорошо известен — это метод неопределенных множителей Лагранжа. Применительно к рассматриваемой задаче он состоит в следующем.

Образуем вспомогательную функцию  $L$ , которая обычно называется функцией Лагранжа:

$$L(C_1, C_2, \dots, C_{k-1}, C_k) = W^*(C_1, C_2, \dots, C_{k-1}, C_k) + \lambda \times (C_1 + C_2 + \dots + C_{k-1} + C_k),$$

где  $\lambda$  — подлежащий определению из условия оптимальности  $L$  множитель Лагранжа — дополнительная независимая переменная.

Для нахождения решения задачи (1.1)-(1.3) функцию  $L$  следует исследовать на безусловный экстремум. При этом получаем следующую систему уравнений:

$$dW^*/dC_j + \lambda = 0 \quad \forall j=1 \dots k,$$

из которой непосредственно следует, что в экстремальной точке

$$dW^*/dC_j = \text{const},$$

так как  $dW^*/dC_j = -\lambda = dW^*/dC_i$  для различных сочетаний  $j \neq i$ .

Поэтому  $(dW/dN_j) \times (dN_j/dC_j) = \text{const}$ . Величина  $(dN_j/dC_j)$  определяет затраты на покупку единицы вооружения  $j$ -го типа или, иначе говоря, цену  $c_j$  продажи фирмой государству единицы этого вооружения.

Заметим, что данном конкретном случае — только одно ограничение-

равенство линейного вида — для решения рассмотренной выше оптимизационной задачи можно было достаточно просто поступить иначе — выразить одну из величин  $C_j$  через другие, подставить полученное выражение в исходную целевую функцию  $W^*(C_1, C_2, \dots, C_{k-1}, C_k)$  и далее исследовать ее уже на безусловный экстремум — результат оказался бы тем же самым.

Введем следующие обозначения:

$$\varphi_{cj} = dW^*/dC_j;$$

$$\varphi_{nj} = dW/dN_j = \varphi_{cj} \times dC_j/dN_j = \varphi_{cj} \times c_j.$$

Назовем  $\varphi_{nj}$  удельным боевым потенциалом, а  $\varphi_{cj}$  — удельным военно-экономическим потенциалом  $j$ -го комплекса (образца) вооружения. Тогда получаем, что рационально сформированная программа закупок ВВТ должна быть такой, чтобы соблюдались следующие условия:

$$\varphi_{cj} = \text{const};$$

$$\varphi_{nj} = \text{const} \times c_j.$$

В содержательной форме полученный вывод может быть представлен в двух эквивалентных формулировках.

*1. Для рационально построенного плана закупок ВВТ удельные боевые потенциалы ее компонентов должны быть пропорциональны ценам продаж комплексов (образцов) вооружения различного типа.*

*2. Для рационально построенного плана закупок ВВТ удельные военно-экономические потенциалы ее компонентов должны быть равны. Иногда вторую формулировку удобнее представить также в следующей редакции.*

*2а) Для рационально построенного плана закупок ВВТ величина отдачи от каждой дополнительной малой порции финансового ресурса не зависит от направления его использования.*

Небольшое пояснение — под направлениями использования финансовых средств подразумевается альтернативные варианты приобретения возможных количеств различных комплексов (образцов) ВВТ. Вывод 2а) утверждает, что правильно построенный план закупок характеризуется тем, что в случае появления малого количества дополнительных финансовых средств безразлично, на приобретение дополнительного количества какого типа вооружения расходовать эти средства: первого, второго, третьего и т.д. или их возможных комбинаций — приращение обобщенного показателя технического уровня будет при этом одним и тем же. Эта ситуация аналогична действующему в совершенной

рыночной экономике закону одинаковой доходности в различных сферах использования капитала: экономический агент может вкладывать свои деньги в любую сферу деятельности, которая приносит доход (производство, торговля, банк) — прибыль на единицу вложенных средств везде будет одинакова.

Таким образом, можно сформулировать задачу заказывающих органов по формированию рационального плана закупок ВВТ как задачу выравнивания военно-экономических потенциалов различных типов ВВТ.

Если экономика и рыночные отношения в стране развиты в недостаточной степени, то нет никакой гарантии нормального ритмичного функционирования производящих оборонную продукцию фирм. Не исключается возможность их банкротства и связанного с ним последующего разрушения ценных для обороны страны производств (при открытой экономике осложнение экономической ситуации для фирмы может быть также искусственно создано вероятными противниками). В этих случаях государство, насколько это позволяет общая экономическая ситуация в стране, обязано помимо формирования рационального плана закупок ВВТ дополнительно заботиться о благополучном или, по крайней мере — приемлемом, экономическом существовании и развитии важных оборонных производств. Поэтому заказывающие органы Министерства обороны должны вникать в суть технической политики производящих вооружение фирм, в частности участвовать в определении перспектив разработки и создания нового вооружения. Таким образом, целесообразность (или наоборот — нецелесообразность) разработки новых средств ВВТ перестает быть внутренним делом фирмы и становится задачей государственной важности. В этом случае заказывающие органы уже должны не только формировать планы закупок ВВТ, но и разрабатывать значительно более сложную систему мероприятий по заказам разработок новой военной техники, ее закупкам и ремонту. Планы реализации этих мероприятий получили специальное название — Программы вооружения.

С сожалением приходится констатировать, что в настоящее время не существует законченного теоретического аппарата по обоснованию предложений во все Программы вооружения. Несмотря на то, что накоплен большой опыт работы различных экспертных групп, созданы банки данных и разработаны остроумные методики определения (точнее, оценки) ожидаемых стоимостных характеристик перспективного вооружения на основе прогнозирования существующих тенденций, в специальных научных организациях проводятся исследования по оценкам ожидаемой боевой эффективности перспективных систем и комплексов ВВТ в различных условиях их применения, до сих пор еще не создано целостной, логически непротиворечивой, обладающей высокой объяснительной способностью, теоретической схемы обоснования предложений по формированию рациональных Программ вооружения. Более того, не говоря уже о



рациональности, не существует даже метода проверки реализуемости предложенных вариантов Программ.

В данной работе мы попытаемся, насколько это окажется в наших силах, ликвидировать эти «пробелы».

Для начала попробуем ответить на следующий простой вопрос (хотя вопрос-то простой, но исчерпывающий ответ на него будет получить нелегко): если планируется разработка нового вооружения, то какие существуют военно-экономические условия, определяющие целесообразности его создания? Существует ли простой военно-экономический критерий или более сложное критериальное условие для обоснования принятия решения на разработку нового вооружения?

Действительно, если новое вооружение окажется не достаточно эффективным или чрезмерно дорогим по сравнению с уже существующими отечественными аналогами, то может оказаться нецелесообразным серийно производить его по экономическим соображениям, поскольку при этом необходимо будет по крайней мере, окупить затраты на разработку.

Попробуем установить критерий целесообразности разработки нового вооружения из рассмотрения следующей упрощенной схемы, оперирующей только двумя поколениями вооружения.

Введем следующие обозначения:

$W_i, W_{i+1}$  — показатели эффективности (полезности) единичных комплексов (образцов) соответственно существующего и нового вооружения ( $i$  — порядковый номер поколения вооружения);

$C_i, C_{i+1}$  — стоимости серийного производства единичных комплексов (образцов) существующего и нового вооружения (эффектами освоения производства при определении  $C_i$  и  $C_{i+1}$  пока пренебрегаем);

$\delta_i, \delta_{i+1}$  — величины средних затрат на ремонт единицы вооружения различных поколений;

$C_o$  — стоимость разработки нового вооружения (стоимость НИОКР);

$C_s$  — общая сумма финансовых средств, выделяемых в течение планового периода на развитие (разработку и создание) ВВТ рассматриваемого типа;

$\Delta W_i$  и  $\Delta W_{i+1}$  — приращения общего показателя системы вооружений при создании только ВВТ  $i$ -го и  $(i+1)$ -го поколений, соответственно.

Если новое вооружение вообще не будет разрабатываться и создаваться, то все финансовые средства будут израсходованы только на производство и ремонт старого вооружения. Общее количество  $N_i$  созданных за плановый период комплексов (образцов) этого вооружения будет, очевидно, равно:

$$N_i = \frac{C_s - \delta_i \times N_i}{C_i} .$$

Откуда

$$N_i = \frac{C_s}{C_i + \delta_i} .$$

Предположим далее, что приращение  $\Delta W_i$  обобщенного показателя полезности пропорционально количеству  $N_i$  созданных комплексов (образцов) ВВТ, т.е. что функция полезности — аддитивная, или приближенно может считаться таковой, по крайней мере, в течение планового периода. Такая ситуация может также реализоваться, например, когда зоны действия комплексов (образцов) ВВТ не перекрываются друг с другом и поэтому различные средства ВВТ при функционировании не оказывают влияния друг на друга. В этом случае

$$\Delta W_i = \frac{C_s}{C_i + \delta_i} \times W_i .$$

Для нового вооружения соотношение для определения приращения обобщенного показателя полезности  $\Delta W_{i+1}$  записывается аналогично. Следует только вместо  $C_s$  подставить меньшую величину ( $C_s - C_0$ ), так как теперь часть финансовых средств расходуется на разработку нового вооружения. В итоге имеем:

$$\Delta W_{i+1} = \frac{C_s - C_0}{C_{i+1} + \delta_{i+1}} \times W_{i+1} .$$

Очевидно, что критерий целесообразности разработки и создания нового вооружения может быть теперь записан в следующем виде:

$$\Delta W_{i+1} - \Delta W_i > 0$$

или

$$\frac{C_s - C_0}{C_{i+1} + \delta_{i+1}} \times W_{i+1} - \frac{C_s}{C_i + \delta_i} \times W_i > 0 \quad (1.4)$$

Эквивалентные формулировки этого неравенства:

$$a) \quad W_{i+1} > \frac{C_{i+1} + \delta_{i+1}}{C_i} \times \frac{1}{1 - C_0/C_s} \times W_i ; \quad (1.5)$$

$$б) \quad C_{i+1} + \delta_{i+1} < (C_i + \delta_i) \times (1 - C_0/C_s) \times \frac{W_{i+1}}{W_i} \quad (1.6)$$

показывают, что для того, чтобы создание нового вооружения было оправданным с военно-экономической точки зрения, необходимо превышение его эффективности (полезности) некоторого критериального значения, зависящего от экономических характеристик производства и ремонта старого и нового вооружения, а также от стоимости НИОКР, или же — другая эквивалентная формулировка критериального условия — суммарная стоимость его создания и ремонта в течение планового периода была бы ниже некоторой величины, зависящей от соотношения показателей эффективности (полезности) нового и старого вооружения.

Казалось бы, теперь все ясно: надо только подставить в любое из полученных критериальных соотношений значения соответствующих показателей и вопрос о целесообразности создания новых поколений ВВТ будет окончательно решен. Если новое вооружение превосходит существующее по военно-экономическим показателям, то план закупок и поставок ВВТ следует формировать в расчете на перспективное вооружение с соответствующей переоценкой стоимостного ограничения для учета стоимости проведения НИОКР; в противоположном случае — план следует ориентировать на существующую военную технику.

Но, как говорится, если бы проблема решалась так просто, то мы с Вами, уважаемый читатель, ею не занимались.

Проанализируем еще раз те допущения, которые легли в основу установленных выше критериальных соотношений. Мы предполагаем показать ниже, что, хотя установленные условия являются необходимыми (это доказано выше), но они еще далеко не достаточны и поэтому не могут быть непосредственно использованы для оценки перспектив развития ВВТ. Мы не будем отвлекаться на второстепенные моменты; остановимся на главных из них.

В самом деле, при выводе соотношений (1.4)-(1.6) неявным образом предполагалось, что время проведения НИОКР может быть как угодно малым, т.е. теоретически НИОКР проводится практически мгновенно. Кроме этого считалось также — и это второе неявное предположение — что потребность в ВВТ в различные моменты времени одинакова. Так как потребность в вооружении определяется военной угрозой, то, говоря другими словами, предполагалось, что военная угроза — стационарная. Строго говоря, только в этом случае можно корректно сравнивать друг с

другом показатели полезности нового и существующего вооружения.

В действительности время  $\tau$  проведения НИОКР составляет обычно порядка нескольких лет. Поэтому показатели полезности старого и нового поколений средств вооружения относятся, вообще говоря, к различным временам. За время  $\tau$  проведения НИОКР могут случиться самые неприятные вещи. Может, например, ухудшиться международная обстановка и резко возрасти военная угроза. Это потребует адекватной реакции от заказывающих ВВТ военных ведомств по максимальному наращиванию боевого потенциала ВВТ. А что делать, что часть финансовых средств уже израсходована и продолжает расходоваться на проведение исследований? Можно сделать вывод, что эти средства были израсходованы напрасно, так как к началу военного конфликта перспективное вооружение еще не будет создано.

А если военная угроза, наоборот, за время  $\tau$  разработки резко уменьшится? Тогда в случае проведения НИОКР мы будем располагать высокоэффективным и (или) дешевым вооружением, но потребность в нем отпадет. Опять деньги израсходованы неэффективно — пока военная угроза еще велика лучше было бы планировать создание не нового, а существующего вооружения, способного не в будущем, а уже сегодня, противостоять военной опасности.

Или другой вариант развития ситуации — резко уменьшилось общее финансирование развития ВВТ. Такое положение характерно для настоящего времени. Тогда само проведение НИОКР может оказать «медвежью услугу» производству ВВТ: поскольку часть финансовых средств расходуется на проведение исследования и создание опытных комплексов (образцов), все меньше денег остается на производство вооружения. Может оказаться, что благодаря отчислению части средств на НИОКР, уровень ассигнований изготавливающих военную технику предприятий опустится ниже минимально допустимой величины и фирма обанкротится. В итоге, желая обеспечить развитие ВВТ и планируя соответствующие НИОКР, мы тем самым способствовали разрушению производства.

Из этих простых примеров следует, что представленные выше критериальные соотношения не учитывают такой фактор, как реализуемость Программы вооружения во всем рассматриваемом временном интервале (в указанных соотношениях в явном виде вообще не используется понятие о горизонте планирования  $T$ , хотя неявно  $T$  учитывается при определении величин  $C_s$  общего финансового ресурса и затрат  $\delta_i$  и  $\delta_{i+1}$  на ремонт ВВТ).

Непосредственному применению соотношений (1.4)-(1.6) препятствует также следующее обстоятельство. В этих соотношениях величина  $C_s$  общего финансирования развития ВВТ относится к одному конкретному типу вооружения. На практике же обычно оказывается известным общий объем финансирования не одного типа ВВТ, а целой, иногда достаточно

представительной, совокупности ВВТ. Поэтому необходимо, прежде всего, решить вопрос о распределении общих финансовых средств по различным направлениям. На этом пути мы можем прийти к некоторой оптимизационной задаче — задаче математического программирования — которую, однако, сейчас формулировать и решать не будем, так как ниже мы рассмотрим аналогичную задачу в более общей постановке. Здесь важно лишь отметить, что в общем случае это приводит к потере аналитической формы критериальных условий.

Наконец, критериальные условия в форме (1.4)-(1.6) не учитывают затрат на содержание обслуживающего ВВТ личного состава, в частности — расходов на боевую подготовку. Наличие этих составляющих затрат может существенным образом деформировать условия, определяющие целесообразность разработки нового вооружения. Действительно, если, например, новое вооружение будет иметь такие же показатели «эффективность-стоимость-надежность», что и существующее, но при этом требует значительно меньших затрат на боевую подготовку, то его разработка может оказаться выгодной, даже если при этом стоимость проведения НИОКР велика.

Представленные соображения на наш взгляд достаточно убедительно показывают, что вопрос о целесообразности или, наоборот, нецелесообразности организации и проведения только одной группы входящих в Программу вооружения мероприятий — НИОКР — оказывается более сложным и неоднозначным, чем это представляется первоначально. Необходимо анализировать весь процесс не «точечно» в каждый отдельный момент времени, а рассматривать его временную развертку, проверяя в каждый момент выполнения различных дополнительных условий и ограничений. В частности, мы обязаны учитывать динамику военных угроз, которая, если пользоваться экономическими терминами, по сути дела определяет динамику спроса на вооружение, а также возможные временные изменения общего финансирования всей Программы развития вооружения.

Осознание наличия недостатков — вещь полезная. Это начало пути к их устранению. Но еще более важным является как можно более точная формулировка (в идеале — формализация) целевых установок и задачи исследования. Существует проверенное практикой мнение, что уяснение смысла вопроса, проблемы, задачи и придание четкой и, по возможности, однозначно понимаемой целеопределенности своим действиям уже на 50% обеспечивает успех в достижении поставленной цели. Поэтому представляется вполне логичным, что сейчас мы перейдем к уточнению и формализации целевых установок, стоящих перед разработчиками Программы вооружения. Попытаемся получить выражение для некоторого показателя качества, определяющего совершенство различных вариантов развития ВВТ, иначе говоря — совершенство Программ вооружения.

## **2. Показатель качества программы развития одного типа вооружения**

Сначала для того, чтобы не отвлекаться на детали и для упрощения записей, будем рассматривать только один тип вооружения.

Под типом вооружения мы в дальнейшем будем понимать совокупность комплексов (образцов) ВВТ, решающих аналогичные задачи аналогичными методами и способами, разработанных и разрабатываемых, как правило, одной кооперацией организаций. Например, к одному типу вооружения могут быть отнесены различные зенитные ракетные системы, дальности действия (дальности поражения целей с вероятностью не ниже заданной) которых находятся внутри некоторого интервала. Поэтому в дальнейшем мы, приводя примеры, вообще говоря, будем различать зенитные ракетные системы малой, средней и большой дальности действия.

Образцы ВВТ каждого типа созданы в различное время на различной технологической базе и, как правило, различаются по своим тактико-технико-экономическим характеристикам, хотя и обладают преемственностью. Поэтому внутри каждого типа ВВТ можно выделить несколько поколений вооружения. Будем в дальнейшем в зависимости от задачи рассматривать сразу не более четырех поколений ВВТ: старое, существующее, новое и перспективное.

Под старым поколением ВВТ будем понимать средства вооружения, которые хотя уже сняты с производства, но еще находятся в войсках. Будем считать это поколение ВВТ первым.

Существующее ВВТ — это вооружение второго поколения, которое серийно производится в рассматриваемый момент времени. Производство его отлажено и не требует модернизации.

Новое — третье — поколение ВВТ в настоящий момент времени еще не создано, но для его создания планируется или уже проводится соответствующая НИОКР. Это поколение — ближайший по времени аналог существующего вооружения, который первый пойдет ему на замену.

Наконец, последнее четвертое поколение — перспективное вооружение. В нем предполагается воплотить все известные в данный момент времени технические новшества и результаты исследований, в том числе может быть и те, которые будут реализованы в ВВТ третьего поколения. ВВТ четвертого поколения — это вооружение завтрашнего дня. Предполагается, что для его создания необходимо решить большой комплекс технических проблем, которые не могут быть объединены в рамках одной единственной НИОКР. Поэтому для создания научно-технической базы перспективного вооружения необходимо проведение не менее, чем двух НИОКР.

Заметим, что в общем случае для одного типа ВВТ количество  $i$

рассматриваемых поколений может быть связано с числом  $n$  рассматриваемых НИОКР простым соотношением

$$i = n + 2.$$

В частности, в начале следующего раздела нам придется рассматривать упрощенную ситуацию, когда  $n = 1$ ; в этом случае будем иметь три поколения ВВТ.

Для того, чтоб быть объективной величиной, искомый показатель качества Программы вооружения должен определяться через измеримые величины, которые характеризуют состояние каждого типа ВВТ. Но наиболее общими характеристиками состояния ВВТ являются величины  $N_{ij}(t)$  — количество средств вооружения  $j$ -го типа  $i$ -го поколения. Поэтому мы можем утверждать, что показатель качества — это в общем случае функция или функционал, зависящие от вида функций  $N_{ij}(t)$ . Но как установить явный вид этой функции или функционала? Попробуем применить для этого методы теории полезности.

Для начала введем в рассмотрение понятие технического потенциала рассматриваемого типа вооружения, как функции времени  $t$ . Под техническим потенциалом будем в общем случае понимать 4-х-мерную функцию  $W$  полезности следующего вида:

$$\begin{aligned} W\{ N_1(t), N_2(t), N_3(t), N_4(t) \} = \\ = \{ \omega_1 \times N_1(t) + \omega_2 \times N_2(t) + \omega_3 \times N_3(t) + \omega_4 \times N_4(t) \} \times \exp(-v \times t), \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  — удельные полезности соответственно старого, существующего, нового и перспективного вооружения;

$N_1(t), N_2(t), N_3(t), N_4(t)$  — количества средств ВВТ рассматриваемого типа в момент времени  $t$ ;

$v$  — показатель, определяющий снижение боевых возможностей отечественного вооружения за счет применения противником (противниками) ответных мер.

Физический смысл технического потенциала  $W$  состоит в следующем. Он определяет величину предотвращенного экономического ущерба при применении рассматриваемого типа ВВТ. Масштабом измерения при этом может служить предотвращенный ущерб от использования одного комплекса (образца) существующего ВВТ, т.е. одного образца ВВТ второго поколения (заметьте, что допустима свобода выбора масштаба, так как это не сказывается на процедуре формирования Программы вооружения).

Размерность  $W$  соответствует количеству рассматриваемых поколений ВВТ. Если по существу задачи количество поколений окажется меньшим (ниже нам придется рассматривать случаи двух, трех и четырех поколений

ВВТ), то размерность многомерной функции полезности снижается. Итак, в дальнейшем будем считать, что словосочетания «многомерная функция полезности вида (1.7)» и «технический потенциал ВВТ рассматриваемого типа» эквивалентны.

Прежде, чем перейти к дальнейшим рассуждениям, сделаем одно небольшое отступление. Внимательный читатель, взглянув на выражение (1.7), сразу обнаружит, что оно основано, по крайней мере, на двух допущениях.

Во-первых, предполагается, что многомерная функция  $W$  сформирована аддитивным образом из одномерных функций  $w_i$  полезности, которые относятся к различным поколениям рассматриваемого типа ВВТ:

$$W = \{ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 \} \times \exp(-v \times t),$$

где  $w_i = \omega_i \times N_i$  ( $i = 1...4$ ).

Сам по себе это факт не очевидный и требующий специальной аргументации.

Она сводится к следующему. Для определенности будем рассматривать огневые средства поражения воздушных целей (при желании читатель точно также может рассмотреть и другие, например, информационные системы). Поражение целей каждым огневым средством может производиться в определенной зоне, конфигурация которой определяется техническими характеристиками средства и его расположением на местности. Зоны поражения огневых средств, относящихся к различным поколениям ВВТ, могут, вообще говоря, перекрываться друг с другом. Однако при хорошем целераспределении (или малой концентрации огневых средств) поражение каждой конкретной цели будет осуществляться только тем огневым средством, которое обеспечивает минимальные затраты на поражение. Это естественное условие минимальности затрат фактически приводит к тому, что зоны поражения различных огневых средств, потенциально имея возможности по перекрытию, в действительности часто не перекрываются, т.е. множество поражаемых целей распадается на несколько независимых подмножеств. Поэтому ранжирования вероятностных исходов боевых действий на каком-то одном из этих подмножеств остаются неизменными вне зависимости от ранжирования исходов на остальных множествах. В соответствии с результатами теории полезности уже только одно это обстоятельство приводит к полинейной форме многомерной функции полезности  $W$ , которая, в свою очередь, может быть представлена в одной из двух форм — аддитивной или мультипликативной.

В настоящей работе мы не предполагаем формулировать и решать задачу формирования рациональных Программ вооружения в стохастической постановке, т.е. все результаты и выводы исследования будут иметь детерминированный характер. Теорию полезности мы применяем как



удобный математический аппарат для установления целевых функций оптимизационных задач. Поэтому нам не потребуются такие специфические свойства многомерной функции  $W$  полезности, которые определяют возможность ее применения в задачах с вероятностным исходом. Мы спокойно можем ими пожертвовать ради упрощения задачи. Например, если окажется, что  $W$  — мультипликативная функция, то, логарифмируя ее, мы придем к аддитивной функции логарифмов ее составляющих, хотя с точки зрения последующего использования в вероятностных задачах так поступать было бы нельзя.

Таким образом, после данной оговорки можно считать, что в общем случае  $W$  — многомерная аддитивная функция.

Во-вторых, в соотношении (1.7) также предполагается, что одномерные функции полезности  $w_i$  пропорциональны количествам средств ВВТ различных поколений. Конечно, это тоже упрощение, так как при больших плотностях расположения на местности огневых средств может иметь место перекрытие их зон действия (оно сводится к минимуму при отлаженной системе управления), т.е. функции  $w_i$  должны быть, вообще говоря, вогнутыми. Но мы сознательно выбрали такую форму представления ради возможности получить выражения для  $w_i$  унифицированного вида. Забегая несколько вперед, заметим, что конечные соотношения практически не изменяются, если в них подставить не аддитивные функции, а функции  $w_i(N_i)$  общего вида — алгоритм вычислений немного усложнится, но по сути дела останется тем же самым. Поэтому мы оставляем окончательное решение вопроса о более точном определении вида функций  $w_i(N_i)$  нашим читателям, а сами в дальнейшем будем пользоваться упрощенной линейной зависимостью. Тем более, что аддитивная форма записи позволяет достаточно просто восстановить параметры  $\omega_i$  ( $i=1...4$ ) линейной модели.

Действительно, выбирая в качестве масштабного фактора единичное средство существующего (второго) поколения ВВТ, можно в результате экспертных оценок провести его сопоставление с единичными средствами других поколений ВВТ и получить при этом значения параметров  $\omega_i$ .

Возвращаемся к изложению основного материала.

Сейчас нам нужно будет решить очень важный вопрос. Речь пойдет о сопоставлении целевых установок, относящихся к различным моментам времени, и о временном горизонте планирования  $T$ . Дело в том, что при разработке любых планов, в том числе — Программ вооружения, необходимо учитывать задачи и условия не только сегодняшнего, но и завтрашнего дня. Это постоянно находит свое отражение в практических действиях. В подтверждение можно привести много примеров. Например, совершенно ясно, что с позиций только текущего момента времени, организация и проведение НИОКР — пустая трата времени, денег, материальных и энергетических ресурсов. С этой точки зрения

целесообразнее финансовые средства потратить на создание ВВТ, производство которого уже отработано и налажено, или на его ремонт. Но, учитывая перспективу, в том числе — постоянное совершенствование ВВТ противника и способов их применения, при разработке планов и программ развития вооружения предусматривается отчисление финансовых средств на разработку новых поколений ВВТ, которые могут быть созданы только спустя несколько лет и даже десятков лет. Поэтому, сам факт организации и проведения НИОКР можно рассматривать, как практическое подтверждение ориентации Программ вооружения на перспективу.

Учет перспективных задач приводит к необходимости их сопоставления друг с другом и с задачами настоящего момента. Это очень непростая методологическая проблема. Фактически речь идет о формировании бесконечномерной функции, в которой учитываются полезности для каждого момента времени  $t$  из интервала  $[0, T]$ .

Строго и вообще говоря, обоснование вида агрегированного показателя качества Программ вооружения должно производиться на системном уровне, более высоком, чем Вооруженные Силы, например, на общегосударственном уровне. Анализ функционирования системы в надсистеме с выходом на показатель (показатели), определяющий качество этого функционирования — это общий, методически безупречный, подход к формированию показателя качества (эффективности) любой системы. Но реально из-за сложности рассмотрения сверхбольших систем и связанных с этим неопределенностей такой подход часто не используется. Применяется другой метод: постулируется некоторая разумная форма показателя качества, решаются соответствующие задачи, а затем проводится всесторонний анализ полученных результатов. В случае их пригодности и внутренней непротиворечивости принимается выбранная форма показателя качества.

В настоящее время единственным пригодным для практики методом решения рассматриваемых задач является свертка функций полезности, относящихся к различным моментам времени, в единый агрегированный показатель. Его общий вид определен в первом разделе. Для случая определенного временного горизонта, который мы по указанным в предыдущем разделе причинам будем далее рассматривать в качестве основного:

$$W^* = \int_0^T a'(t) \times (1+r)^{-t} dt, \quad (1.8)$$

где  $T$  — горизонт планирования, т.е. время планирования или время пролонгации в будущее плана развития ВВТ (мы изменили обозначения показателя, что несущественно).

Выражение (1.8) определено с точностью до функции  $a'(t)$ , которую нам предстоит установить. Для этого мы рассмотрим частный случай, когда не

только будущее потребление финансового ресурса не зависит по полезности от прошлого, но и прошлое потребление не зависит от будущего. Иными словами, мы усилим первое допущение, принятое при установлении соотношения (1.8) — будем предполагать взаимную независимость по полезности будущего и прошлого потребления. Это упрощение позволит определить вид функции  $a'(t)$ .

Пойдем с самого начала. Рассмотрим интегральный показатель, который также обозначим  $W^*$ :

$$W^* = \int_0^T W(t) \times \varphi(t) \times dt, \quad (1.9)$$

где  $\varphi(t)$  — плотность вероятности возникновения военных конфликтов.

Величина  $\varphi(t)$  может устанавливаться экспертными и расчетными методами с учетом данных внешней разведки из системного анализа внешнеполитических и внутриполитических факторов. Мы понимаем, что это очень непростая проблема, но обойтись без ее решения, к сожалению, не представляется возможным, поскольку именно динамика внешней угрозы определяет *спрос государства на вооружение*. Поэтому, несмотря на возможные сложности прогнозирования этой величины (как мы представляем, для этого необходима специальная экспертно-расчетная система), необходимость ее включения в общую схему метода сомнений не вызывает. Ниже мы будем рассматривать  $\varphi(t)$  как исходную функциональную зависимость, оставляя в стороне обсуждение возможных методов ее установления.

Так как

$$\int_0^T \varphi(t) \times dt = 1, \quad (1.10)$$

то, очевидно, что горизонт планирования соответствует промежутку времени  $T_k$  до возникновения первого военного конфликта с практически единичной вероятностью. Это не противоречит логике. Действительно, нет никакого смысла планировать развитие ВВТ за момент времени  $T_k$ , так как после военного конфликта неизбежно изменится международное положение государства, приоритеты его внешней и внутренней политики, а значит — и целевые установки для Вооруженных Сил и в частности — для Программы вооружения. Кроме этого, с учетом приобретенного военного опыта, изменятся представления о значимости различных типов ВВТ. Поэтому установка значения параметра  $T$ , как ожидаемого промежутка времени  $T_k$  до ближайшего военного конфликта, представляется вполне естественной.

С другой стороны, в соответствии с федеральным законом, Программа

разработки, создания и производства ВВТ планируется и формируется на десятилетний период. Это связано с необходимостью обеспечения сопряжения процесса производства ВВТ с общеэкономическим развитием государства, в котором наблюдаются циклы различной продолжительности. Поэтому величина параметра  $T$  не должна превышать характерное время  $T_n$  ( $T_n=10$  лет) планирования развития вооружения, как составной части всего народнохозяйственного производства.

Обобщая указанные выше оценки, приходим к выводу, что логично установить следующее значение параметра  $T$ :

$$T = \min [T_k, T_n] .$$

Заметим, что при  $T < T_k$  вместо (1.10) должно быть

$$\int_0^T \varphi(t) \times dt = P < 1 ;$$

принципиально это ничего не изменяет: целевая функция изменится в  $P$  раз, что не окажет никакого влияния на остальные элементы решения оптимизационной задачи, к рассмотрению которой, как будет показано ниже, сведется формирование рациональной Программы вооружения.

В подынтегральном выражении (1.9) стоит величина, определяющая востребованные значения технического потенциала в различные моменты времени. Этим она отличается от  $W(t)$ , так как отсутствие военной угрозы обнуляет это значение  $W(t)$ , каким бы большим оно само по себе ни было, придает ему нулевую значимость. Чем больше величина  $\varphi(t)$ , тем более значимым для разработчиков Программы вооружения является момент времени  $t$ . Поэтому произведение  $\varphi(t) \times dt$  может рассматриваться как весовой фактор (фактор важности) в аддитивной функции полезности  $W^*$  ВВТ, агрегирующей полезности  $W(t)$  в различные моменты времени.

Отметим очень важное свойство (1.9): в интегральной записи представлены значения технического потенциала для всех моментов времени в пределах всего горизонта планирования, т.е. учитываются все возможные состояния ВВТ, как это и должно быть.

Исходя из теории полезности, можно показать, что функция  $W^*$  должна быть аддитивной функцией  $W(t) \times \varphi(t)$ , где под  $W(t)$  подразумевается совокупность функций полезности в различные моменты времени. При  $dt \rightarrow 0$  соответствующая сумма будет иметь своим пределом определенный интеграл (1.9), равный среднему значению  $W(t)$  или, что в данном случае одно и то же, математическому ожиданию технического потенциала  $W(t)$  ВВТ.

Но это еще не все. Рассмотрим случай стационарной военной угрозы, когда  $\varphi(t) = \text{const} = 1/T$ . Из (1.9) имеем:

$$W^* = T^{-1} \times \int_0^T W(t) \times dt ,$$

т.е. различные моменты с точностью до фактора  $W(t)$  в данном представлении оказываются эквивалентными.

Но известно, что это, вообще говоря, не соответствует действительности: при прочих равных условиях значимость более ранних моментов времени оказывается большей, чем отдаленных. Это эффект убывающей значимости может быть учтен при помощи специального коэффициента дисконтирования, переводящего величины, относящиеся к моменту времени  $t$ , на текущий момент времени.

Вводя в рассмотрение новый параметр  $r$ , будем иметь вместо (1.9) следующее выражение для определения  $W^*$ :

$$W^* = \int_0^T (1 + r)^{-t} \times W(t) \times \varphi(t) \times dt . \quad (1.11)$$

Природа коэффициента дисконтирования  $(1 + r)^{-t}$  и величина параметра  $r$  могут быть установлены из экономического смысла соотношения (1.11), если под  $W(t)$  и  $W^*$  понимать величины, связанные с предотвращенным экономическим ущербом, т.е. рассматривать технические потенциалы ВВТ с экономической точки зрения.

Тогда введение коэффициента дисконтирования  $(1 + r)^{-t}$  отражает хорошо известный факт убывающей полезности денег со временем. В экономике деньги ценятся дороже сегодня, чем в будущем. Например, если годовой банковский процент составляет  $h$  % (в совершенной рыночной экономике доходность различных факторов производства одинакова; поэтому случай финансового капитала выбран просто для определенности, можно было бы рассмотреть также случай инвестиций в промышленное производство), то сегодня сумма денег в  $s$  единиц спустя  $t$  лет будет эквивалентна сумме  $s \times (1 + h/100)^t = s \times (1 + r)^t$ . Причем эта закономерность действует как при отсутствии, так и при наличии инфляции в экономике страны; в последнем случае под  $h$  следует понимать номинальную величину банковского процента. Конечно, введенный в рассмотрение параметр  $r$  представляет более сложным образом определяемую величину, чем просто банковский процент по вкладам, но суть явления от этого не изменяется — это удешевление денег со временем. Говоря языком теории полезности, коэффициент дисконтирования вводится для сопоставления сегодняшних и будущих накоплений, доходов и расходов в реальном исчислении.

Поэтому один и тот же предотвращенный ущерб в более раннее время оказывается более значимым, чем в более позднее, так как «сэкономленные» таким образом средства можно заставить «заработать» в экономике и принести дополнительный доход в будущем. Этим и объясняется появление

множителя  $(1 + r)^{-t}$  в подынтегральном выражении (1.11). Заметим, что теперь  $W^*$  уже нельзя считать математическим ожиданием технического потенциала.

Заметим, что при переходе от (1.9) к (1.11) мы уже частично отступили от взаимонезависимости по полезности потоков ресурса, относящихся к различным моментам времени, приняв более мягкое и вместе с тем — более реалистическое предположение о возможности их сопоставления при помощи постоянного коэффициента дисконтирования.

Следующий момент. По мере развития экономики страны или ее отдельного района могут возрастать количество обороняемых экономических объектов и их абсолютная стоимость, т.е. говоря другими словами, изменяться общая ценность защищаемых объектов. Этот фактор может быть учтен введением дополнительного корректирующего множителя в подынтегральное выражение (1.11), которому для отражения основных закономерностей процесса развития целесообразно придать экспоненциальную форму.

Таким образом, окончательно будем иметь:

$$W_0^* = \int_0^T (1 + r)^{-t} \times \exp(\gamma \times t) \times W(t) \times \varphi(t) \times dt, \quad (1.12)$$

где  $\gamma$  — показатель экономического роста, величина которого, вообще говоря, может зависеть от конкретного района предполагаемых боевых действий.

Заметим, что в общем случае величина  $\gamma$  может быть как положительной, так и отрицательной; последнее соответствует экономическому спаду в рассматриваемом районе.

Если теперь мы сравним (1.9) и (1.12), то увидим, что это одно и то же выражение, но записанное при помощи различных обозначений. Действительно, если положить

$$a'(t) = W(t) \times \varphi(t) \times \exp(\gamma \times t),$$

то тождественность двух указанных выражений будет очевидна. Поэтому можно считать установленными вид функции  $a'(t)$  и вид интегрального показателя качества Программы, который, таким образом, представляет функционал (1.12).

Для краткости последующих записей введем новое обозначение:

$$f(t) = \varphi(t) \times \exp(\gamma \times t) \times (1 + r)^{-t}.$$

Тогда величина  $W^*$  будет представлять собой усредненное по времени с весом  $f(t)$  значение технического потенциала ВВТ. Используя экономические термины, можно сказать, что  $W^*$  определяет среднюю величину реализованного продукта, произведенного в сфере военного производства.

Обобщим теперь соотношение (1.12) на случай нескольких типов ВВТ.

### 3. Показатель качества Программы вооружения. Формализация задачи обоснования рациональных вариантов Программы вооружения

Сначала перепишем соотношение (1.12) в следующем виде:

$$W_0^* = \int_0^T (1+r)^{-t} \times \exp(\gamma \times t) \times W(t, q, e) \times \varphi(t) \times dt, \quad (1.12)$$

где одним символом «e» обозначена совокупность исходных данных, от значений которых будет зависеть текущее значение технического потенциала (в основном это — различные нормативные коэффициенты), а символом q — совокупность неотрицательных параметров, которыми разработчики Программы вооружения могут в определенных пределах распоряжаться по своему усмотрению, естественно подбирая их таким образом, чтобы получить максимальный положительный эффект. Иначе говоря, q — это совокупность оптимизируемых параметров.

Сейчас не будем уточнять смысл образующих множества q и «e» элементов, откладывая это до следующих разделов книги. Здесь достаточно лишь подчеркнуть, что подобные множества в принципе существуют и их элементы вместе с t формируют значения  $W^*$ .

Если мы будем рассматривать не один тип ВВТ, а их совокупность, т.е. будем анализировать Программу вооружения в целом, то естественным обобщением используемого ранее показателя  $W^*$  будет показатель

$$W_0^* = \int_0^T (1+r)^{-t} \times \exp(\gamma \times t) \times F\{W_1(t, q, e), W_2(t, q, e), \dots, W_k(t, q, e)\} \times \varphi(t) \times dt, \quad (1.13)$$

для которого мы сохранили прежнее обозначение. Теперь  $W^*$  уже с полным правом может быть назван показателем качества Программы вооружения.

В выражении (1.13):

$W_1, W_2, \dots, W_k$  — полезности различных типов комплексов (образцов) ВВТ, общее количество которых равно k;

$F\{W_1, W_2, \dots, W_k\}$  — обобщенная многомерная функция полезности k комплексов (образцов) ВВТ;

**q, e** — множества (в дальнейшем **q** будет оформлен как вектор), аналогичные «и», но относящиеся ко всем типам ВВТ (поскольку развитие разных типов ВВТ происходит комплексно, а не независимо друг от друга, то значения для всех  $j=1\dots k$  величины  $W_j$  должны зависеть от всей совокупности образующих **q, e** параметров).

Заметим, что в общем случае различные типы ВВТ уже нельзя считать независимыми по полезности друг от друга, как для средств ВВТ одного



типа, но различных поколений. Поэтому, вообще говоря, функцию  $F$  следует считать функцией общего вида.

Фактически обобщенная многомерная функция полезности  $F$  указывает на существование *альтернативных возможностей* в развитии системы вооружения — уменьшение полезности за счет снижения количеств одних типов ВВТ может быть компенсировано увеличением количеств вооружения другого типа (или других типов). Но если возможны различные комбинации изменений количеств ВВТ разных поколений, совместимые с заданными ресурсными ограничениями, то значит должен существовать и оптимальный по обобщенной полезности вариант развития вооружения.

Определение функции  $F$  (а также рассматриваемых ниже аналогичных функций  $F_m$ ) должно производиться по результатам оперативно-тактического анализа применения вооружения при военном конфликте. Это очень непростая проблема, требующая проведения комплекса специальных военно-теоретических исследований и уточнения их результатов и лежащих в основе допущений по данным командно-штабных учений и тренировок с привлечением военных специалистов различных специальностей и уровня. Поэтому, коротко говоря, формирование обобщенного показателя полезности ВВТ — функции  $F$  — это сложная экспертно-расчетная процедура. В настоящей книге мы не будем останавливаться на этом вопросе, считая, что функция  $F$  задана извне, т.е. входит в перечень исходных данных для исследования.

В масштабах такой страны, как Российская Федерация, условия возникновения и протекания военных конфликтов в различных зонах и районах возможных боевых действий, на различных оперативно-тактических и оперативно-стратегических направлениях могут быть весьма разнообразными и существенно отличаться друг от друга. Соответственно этому, относительные значимости различных типов ВВТ также могут различаться в зависимости от района (региона) их предполагаемого применения. Формально это приводит к тому, что для всех районов возможных боевых действий в этих условиях уже нельзя считать универсальными плотность  $\varphi(t)$  вероятности возникновения военных конфликтов, а также многомерную функцию  $F$  полезности ВВТ; более логично применительно к каждому району рассматривать совокупности  $\varphi_m$  и  $F_m$  соответствующих функций. Поэтому хотя разработка целостной Программы вооружения должна проводиться централизованно, при этом необходимо учитывать специфику каждого района предполагаемых боевых действий и его относительную важность для страны и, в частности, для ее экономики.

При высокой скоротечности военных конфликтов и больших масштабах каждого района возможных боевых действий процессы функционирования комплексов (образцов) ВВТ в различных районах можно считать практически независимыми друг от друга. В этом случае выражение для

показателя  $W^*$  может быть записано следующим образом:

$$W^*(\mathbf{q}, \mathbf{e}, \mathbf{f}) = \int_0^T (1+r)^{-t} \times \sum_{m=1}^M \rho_m \times \exp(\gamma_m \times t) \times \Omega_m(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \times dt,$$

где:  $M$  — количество рассматриваемых районов (регионов, направлений) возможных боевых действий;

$\rho_m$  — относительная важность  $m$ -го района в момент времени  $t=0$ ;

$$\sum_{m=1}^M \rho_m = 1;$$

$\gamma_m$  — показатель экономического роста  $m$ -го района;

$$\Omega_m(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}, \mathbf{f}) = F_m\{W_1(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}), W_2(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}), \dots, W_{k-1}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}), W_k(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})\} \times \varphi_m(t);$$

$\mathbf{f}$  - множество, образованное совокупностью функций  $\varphi_m$ ,  $F_m$ , а также рассматриваемой ниже функцией  $S(t)$ , определяющей объемы общего ежегодного финансирования предусмотренных Программой вооружения мероприятий.

Выражение (1.13) может рассматриваться как окончательное для вычислений значений показателя качества Программы вооружения. Но поскольку далее предполагается его использование в вычислительной программе при численной оптимизации, то желательно придать (1.13) более компактный вид, облегчающий его использование в алгоритме. Дело в том, что в (1.13) присутствуют несколько циклов суммирования: по поколениям ВВТ, по районам возможных боевых действий; кроме этого, при обращении к функциям  $F_m$  также возможны операции суммирования. Действительно, в самом простом случае для аддитивной функции  $F_m$  будем иметь:

$$F_m(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) = \sum_{j=1}^k a_{mj} \times W_j(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}),$$

т.е. еще одну внутреннюю сумму (коэффициенты  $a_{mj}$  —соответствующие «веса», определяющие значимости различных типов ВВТ; естественно, что в общем случае они могут зависеть от параметра  $m$  — переменной порядкового типа, определяющей район боевых действий).

Определение параметров  $\rho_m$ , а также коэффициентов  $a_{mj}$  линейной формы  $F_m(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$  могут быть применены методы обработки матриц парных сравнений. Существо этих методов будет изложено в следующем подразделе.

Для удобства и надежности правильного вычисления на ЭВМ подобных, вложенных одна в другую сумм, часто используется матричный метод, так как в пакеты прикладных вычислительных программ обычно включаются отлаженные стандартные программы матричной алгебры.



$$G(t) = \begin{pmatrix} \exp(\gamma_1 \times t) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \exp(\gamma_2 \times t) & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \exp(\gamma_{M-1} \times t) & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \exp(\gamma_M \times t) \end{pmatrix}$$

$G(t)$  — квадратная матрица размерностью  $M \times M$ , диагональные элементы которой определяют экономический рост в различных районах предполагаемых боевых действий в относительных единицах по отношению к моменту  $t=0$ .

$$W(t, q, e) = \begin{pmatrix} W_1(t, q, e) \\ W_2(t, q, e) \\ W_3(t, q, e) \\ \dots \\ W_j(t, q, e) \\ \dots \\ W_{k-1}(t, q, e) \\ W_k(t, q, e) \end{pmatrix}$$

$W(t, q, e)$  — матрица-столбец размерностью  $k$ , элементы которой определяют полезности различных типов ВВТ. В соответствии с предыдущим и основными правилами матричной алгебры, можно записать следующее матричное соотношение:

$$W(t, q, e) = B(t) \times C \times N(t, q, e).$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1,k-1} & a_{1,k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2,k-1} & a_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M-1,1} & a_{M-1,2} & \dots & a_{M-1,k-1} & a_{M-1,k} \\ a_{M,1} & a_{M,2} & \dots & a_{M,k-1} & a_{M,k} \end{pmatrix}$$

$A$  — матрица элементов  $a_{mj}$  линейной формы для обобщенной линейной функции полезности ВВТ; размерность  $A$  -  $M \times k$ .

$$R(t) = \left[ \rho_1 \times \varphi_1(t), \rho_2 \times \varphi_2(t), \dots, \rho_{M-1} \times \varphi_{M-1}(t), \rho_M \times \varphi_M(t) \right]$$

Элементы матрицы-строки  $R(t)$  определяют произведения

относительных важностей различных районов предполагаемых боевых действий и соответствующих плотностей вероятности их возникновения; размерность (число столбцов)  $\mathbf{R}(t)$  -  $M$ .

Применяя эти матрицы, в случае линейных функций  $F_m(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$  мы можем записать выражение для усредненного технического потенциала  $W^*$  следующим образом:

$$W^*((\mathbf{q}, \mathbf{e}, \mathbf{f})_0^T = \int_0^T (1+r)^{-t} \times \mathbf{R}(t) \times \mathbf{G}(t) \times \mathbf{A} \times \mathbf{B}(t) \times \mathbf{C} \times \mathbf{N}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \times dt \quad (1.14)$$

Действительно, матричное произведение  $\mathbf{A} \times \mathbf{B}(t) \times \mathbf{C} \times \mathbf{N}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$  определяет матрицу-столбец  $\mathbf{W}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$  с элементами  $W_j$  ( $j = 1 \dots k$ ), а последующая свертка этого столбца с произведением матриц  $\mathbf{R}(t) \times \mathbf{G}(t)$  выводит нас на окончательное выражение для  $W^*$ .

Для обобщения (1.14) на случаи, когда функции  $F_m$  — функции общего вида, введем в рассмотрение дополнительную матрицу-столбец  $\mathbf{F}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$  размерностью  $M$  с элементами  $F_m$ :

$$\mathbf{F}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) = \begin{pmatrix} F_1(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \\ F_2(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \\ \dots\dots\dots \\ F_{M-1}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \\ F_M(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \end{pmatrix},$$

а также матричный оператор  $\mathfrak{Z}$ , который, действуя на  $\mathbf{W}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$ , преобразует его в  $\mathbf{F}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$ . Оператор  $\mathfrak{Z}$  эквивалентен системе из  $M$  функций вида  $F_i(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$ .

В этих обозначения общей формой  $W^*$  будет следующее выражение:

$$W^*((\mathbf{q}, \mathbf{e}, \mathbf{f})_0^T = \int_0^T (1+r)^{-t} \times \mathbf{R}(t) \times \mathbf{G}(t) \times \mathfrak{Z} \{ \mathbf{B}(t) \times \mathbf{C} \times \mathbf{N}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \} \times dt \quad (1.15)$$

Итак, мы достигли того, чего хотели на данном этапе исследования. Теперь мы знаем, как оценить качество Программы вооружения и сравнивать ее различные варианты друг с другом. Для этого надо воспользоваться интегральным показателем  $W^*$  в форме (1.15): тот вариант Программы, для которого этот интегральный показатель будет наибольшим, доминирует над остальными.

Возможно, кто-то из читателей сейчас подумал: ну вот еще одна формула, в которой предлагается перемножить несколько матриц и этим решить все сложные проблемы. Правда, результат хотят еще и проинтегрировать, но меня-то подобной новизной не удивишь — в своей жизни я повидал много интегралов, которые, существуя сами по себе, никому не принесли особой пользы, в том числе и тем, кто их однажды написал.

Если бы представленная выше формула (1.15) рассматривалась просто

как интегральное выражение, которое только и осталось, что вычислить (неважно, аналитическими или численными методами), то с читателем следовало бы в чем-то согласиться. Но все дело в том, что авторы рассматривают (1.15) не только и даже не столько как формульное выражение для некоторого показателя, а скорее как формализацию плана и программы (здесь это слово нами употреблено в другом значении) дальнейших исследований по обоснованию целевых установок, стоящих перед разработчиками Программы вооружения. Оно позволяет провести декомпозицию проблемы определения показателя качества программно-целевого планирования на ряд менее сложных и более понятных вопросов, каждый из которых, конечно, также потребует своего последующего решения.

Можно привести следующую аналогию. Предположим, требуется создать сложную и уникальную техническую систему, например, новый тип летательного аппарата. Опыта разработки таких систем нет. Конструкторы проводят анализ этой системы: пытаются представить ее в виде взаимосвязанной совокупности агрегатов-аналогов и отдельных элементов, выявляют основные проблемы их создания, условия дальнейшего сопряжения и т.д. То есть процесс разработки идет по пути сведения новой системы к агрегатам и элементам с уже известными или, по крайней мере, более или менее надежно прогнозируемыми свойствами, комбинируя которые, можно будет в результате одной или нескольких итераций выйти на решение поставленной задачи. И совершенно неуместно критиковать конструкторов за то, что они во время работы над проектом сначала наметили план его реализации, стараясь свести новую общую задачу к совокупности нескольких частных, уже известных и более просто решаемых. План — это еще не готовое изделие, но без него новая техническая система никогда не была бы создана.

В выражении (1.15) — по сути дела то же самое: предлагается способ сведения новой сложной комплексной проблемы к совокупности частных проблем. Их также предстоит решать и это будет далеко не простым делом — чего стоит только определить совокупность функций  $F_m$  или соответствующий им оператор  $\mathcal{Z}$ . Поэтому значимость полученной интегральной формулы заключается в том, что она позволяет наметить *способ решения* рассматриваемой проблемы, сконцентрироваться на *только необходимых* и более простых частных вопросах, а также указывает схему комплексирования полученных частных результатов. Поэтому (1.15) — *это не конечный пункт нашего пути; это сам путь*.

Следование по нему может привести к дальнейшим полезным обобщениям. Можно, например, попытаться увязать в единой Программе вооружения планы развития ВВТ для потребностей Вооруженных Сил с планами экспортных поставок вооружения. В настоящее время актуальность подобного обобщения обусловлена тем обстоятельством, что многие

предприятия-разработчики ВВТ могут существовать только за счет средств, получаемых от экспорта вооружения.

Для учета доходов от экспорта в единой Программе вооружения следует модифицировать показатель  $W^*(q, e, f)$  следующим образом:

$$W^*(q, e, f) \rightarrow W^*(q, e, f) + \int_0^T (1+r)^{-t} \times S(t) \times D(t) \times \Delta N(t, q, e) \times dt, \quad (1.15^*)$$

где  $S(t)$  — матрица строка размерности  $1 \times (4 \times k)$ , элементы которой определяют вероятности возможных экспортных поставок различных типов вооружения;

$D(t)$  — квадратная матрица размерности  $(4 \times k) \times (4 \times k)$ , элементы которой определяют доход от экспорта различных типов ВВТ;  $\Delta N(t, q, e)$  — вектор, компоненты которого представляют собой дополнительные объемы производства ВВТ различного типа.

Из анализа (1.15<sup>\*</sup>) еще более наглядно проявляется экономический смысл показателя  $W^*(q, e, f)$  качества Программы вооружения.

В настоящей книге вопросы экспорта вооружения далее рассматриваться не будут — это тема самостоятельного исследования. Однако очень важно было подчеркнуть, что проблема оптимизации экспорта вооружения должна и может рассматриваться не сама по себе, а в рамках общей Программы вооружения.

Вернемся к вопросу о способе использования показателя  $W^*(q, e, f)$  для оптимизации Программы вооружения.

Представляется вполне логичным, если ее разработчики, варьируя в заданных пределах свободными параметрами  $q$ , будут стараться подобрать (установить, конкретизировать) их значения таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение  $W^*$ .

Таким образом, вполне естественно мы приходим к следующей оптимизационной задаче (задаче математического программирования), которую можно назвать также задачей синтеза Программы вооружения:

$$W_o(e, f) = \max_{q \in Q} \{ W^*(q, e, f) \} = \quad (1.16)$$

$$\max_{q \in Q} \int_0^T (1+r)^{-t} \times R(t) \times G(t) \times \mathcal{J} \{ B(t) \times C \times N(t, q, e) \} \times dt$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^k S_j(t) \leq S(t); \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1.17)$$

$$S_j(t) \geq 0 ; \forall j = 1...k \quad (1.18)$$

$$\mathbf{W}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) = \mathbf{B}(t) \times \mathbf{C} \times \mathbf{N}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \geq \mathbf{W}_{\min} ; \quad (1.19)$$

$$\mathbf{q} \geq \mathbf{0} , \quad (1.20)$$

где  $S_j(t)$  — интенсивности финансирования развития ВВТ  $j$ -го типа;  $S(t)$  — интенсивность финансирования Программы вооружения в целом; далее везде мы будем считать, что величины  $S_j(t)$  и  $S(t)$  измеряются в твердых ценах, при этом  $r$  — это *реальный* коэффициент дисконтирования.

$\mathbf{W}_{\min}$  — матрица столбец размерности  $k$ , элементы которой определяют минимально допустимые значения технического потенциала различных типов ВВТ. Необходимость дополнительного рассмотрения этих минимальных значений обусловлена тем обстоятельством, что введение только одного показателя качества не всегда полностью исчерпывает все целевые установки, заданные системе; поэтому приходится учитывать эти факторы введением дополнительных ограничений. Подробнее этот вопрос рассматривается в следующем разделе.

Матричное неравенство, формирующее третье ограничение, следует понимать в смысле каждого элемента, т.е. каждый элемент матрицы-столбца  $\mathbf{W}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$  должен быть не меньше соответствующего элемента матрицы  $\mathbf{W}_{\min}$ . Поэтому матричная запись эквивалентна  $k$  неравенствам. Аналогичного — для четвертого ограничения.

Может возникнуть вопрос: где и как в (1.17)-(1.20) учтены другие ограничения, связанные, например, с экономической устойчивостью производящих вооружение предприятий и сохранением соответствующих производств, необходимых для обеспечения обороноспособности государства? В выписанной явно системе ограничений эти факторы не нашли своего явного отражения.

Ответ заключается в следующем. Подобные ограничения налагаются на внутренние параметры, которые определяют временные зависимости элементов решения (указанное выше ограничение на обеспечение сохранности производств влияет на зависимости  $N_{ji}(t)$ ). Поэтому их системный уровень оказывается ниже, чем у параметров, указанных в (1.17)-(1.20); в связи с этим, они входят в систему ограничений пока неявно. Технически проще всего это реализовать при помощи штрафных или барьерных функций, встроенных в целевую функцию: если какой-либо внутренний параметр в текущий момент времени выходит за свои граничные условия, на целевую функцию налагается штраф, например, ей присваивается нулевое значение. При наличии оптимизирующей процедуры (оператор  $\max\{ \}$  ) это автоматически приводит к исключению минимальных значений, обеспечивая тем самым выполнение указанных ограничений.



Такой подход позволяет достаточно просто установить реализуемость предлагаемого варианта Программы вооружения. Действительно, если при вычислениях оказывается, что  $W^*(q, e, f) = 0$ , то это будет означать нарушение какого-либо «встроенного» в  $W^*(q, e, f)$  ограничения, т.е. в этом случае при принятом сочетании параметров  $(q, e, f)$  нельзя практически реализовать рассматриваемый вариант Программы вооружения.

Заметим, что величины  $S(t)$  и  $S_j(t)$  в (1.17) и (1.18) соответствуют ценам и нормативам, существующим на момент начала реализации Программы. Последнее означает, что к начальному моменту времени должны быть приведены не только величины выделяемых ассигнований, но также и все затраты на производство вооружения, в частности, уровни заработной платы рабочих и служащих в оборонных отраслях промышленности, т.е. заработная плата должна определяться в реальном, а не в номинальном выражении. Поэтому номинальная величина  $\Sigma(t)$  выделяемых в момент  $t$  ассигнований пересчитывается на реальную величину  $S(t)$  по следующему соотношению:

$$S(t) = \{ \Sigma(t)/k \} \times \{ k/i_z \} = \Sigma(t)/i_z,$$

где  $k$  — индекс цен;

$i_z$  — индекс заработной платы (покупательной способности).

Если в условиях инфляции заработная плата растет медленнее, чем общий уровень цен (у нас в стране так и происходит), то это приводит к более медленному снижению величины реального финансирования предусмотренных Программой вооружения мероприятий, чем в случае полного соответствия темпов роста цен и заработной платы. Таким образом, имеет место эффект замедления снижения общих реальных объемов финансирования.

Последнее замечание. После того, как мы рассмотрели и формализовали задачу в общем виде, т.е. при существовании нескольких районов возможных боевых действий, сделаем упрощение: будем в дальнейшем рассматривать только один такой район. Предположим также, что в течение планового периода  $T$  сколько-нибудь заметного экономического роста в этом районе не предполагается, т.е. будем считать, что

$$G(t) = 1,$$

где  $1$  — единичная матрица; соответственно этому:

$$f(t) = \varphi(t) \times (1 + r)^{-t}.$$

Сути вопроса данное упрощение не изменит, зато упростит запись всех выражений, тем более, что полученные и представленные в этой книге числовые характеристики по вполне понятным соображениям будут иметь иллюстративный характер и не будут относиться к конкретным средствам ВВТ и вариантам Программы вооружения. При необходимости все установленные выражения достаточно просто могут быть обобщены на

случай нескольких районов боевых действий.

При рассмотрении только одного района оператор  $\mathfrak{Z}$  превращается в обычную многопараметрическую функцию  $F$ , матрица-строка  $\mathbf{R}$  — в функцию  $\varphi(t)$ , а задача синтеза Программы вооружения записывается в виде:

$$W_0(\mathbf{e}, \mathbf{f}) = \max_{\mathbf{q} \in Q} \{ W^*(\mathbf{q}, \mathbf{e}, \mathbf{f}) \} = \quad (1.21)$$

$$= \max_{\mathbf{q} \in Q} \int_0^T (1+r)^{-t} \times \varphi(t) \times F \{ \mathbf{B}(t) \times \mathbf{C} \times \mathbf{N}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \} \times dt$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^k S_j(t) \leq S(t); \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1.22)$$

$$S_j(t) \geq 0; \quad \forall j = 1 \dots k \quad (1.23)$$

$$\mathbf{W}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) = \mathbf{B}(t) \times \mathbf{C} \times \mathbf{N}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e}) \geq \mathbf{W}_{\min}; \quad (1.24)$$

$$\mathbf{q} \geq \mathbf{0} \quad (1.25)$$

Для ее решения и анализа последующего практического применения полученных результатов необходимо выполнить следующую последовательность операций.

1. Конкретизировать множества  $(\mathbf{q}, \mathbf{e})$  параметров и разработать метод определения показателей  $\mathbf{W}(t, \mathbf{q}, \mathbf{e})$  и  $W^*(\mathbf{q}, \mathbf{e}, \mathbf{f})$ .

2. Установить размерность оптимизационной задачи и выбрать рациональный метод и алгоритм ее решения, учитывающий специфику оптимизируемой функции.

3. Получить решение оптимизационной задачи (1.21)-(1.25) и исследовать его основные закономерности.

4. Оценить основные цели, принципы организации и функционирования экспертно-расчетной системы по обоснованию реализуемости различных вариантов Программы вооружения и выбору среди них рационального. Определить основные параметры конфигурации экспертно-расчетной системы.

5. Оценить возможную величину экономического эффекта от оптимизации Программы вооружения и провести ее сопоставление с предполагаемыми расходами на содержание и материально-техническое обеспечение функционирования экспертно-расчетной системы. Разработать методику для обоснования предложений по рациональным численностям

специалистов на различных уровнях системы.

Начиная со следующего раздела, мы перейдем к реализации этого плана действий. А сейчас сделаем небольшое отступление и рассмотрим существо очень простых, но вместе с тем — достаточно эффективных методов установления относительных значимостей различных факторов, которые основаны на обработке матриц парных сравнений интенсивностей этих факторов. Использование этих методов позволяет сформировать обобщенную функцию полезности при условии, что она линейна по некоторой группе параметров. Такими параметрами в нашем случае являются, например, относительные важности  $\rho_m$  районов боевых действий.

## 4. Методы парных сравнений (анализа иерархий)

Существо этих методов основано на специальной обработке результатов *экспертных опросов* по парным сравнениям интенсивностей различных фактором. Обычно эти результаты сводятся в некоторую матрицу парных сравнений, которую мы будем обозначать **D**.

Учитывая, что обычно результаты парных сравнений формируются в процессе анализа некоторой иерархической схемы, то за рубежом эти методы получили название «методы парных сравнений и анализа иерархий».

Как уже было отмечено, необходимость применения экспертных методов обусловлена невозможностью проведения на современной вычислительной базе сквозного математического моделирования в масштабах такой сверхбольшой системы, как система вооружения. Поэтому использование вместо чисто формальных расчетных схем экспертных методов можно рассматривать как своеобразную плату за недостаточные возможности современной вычислительной техники.

Но метод методу рознь. Экспертные методы на основе анализа иерархий и результатов парных сравнений зарекомендовали себя как достаточно простые и вместе с тем — достаточно точные. По сути дела, они представляют частный случай методов теории полезности для линейных функций.

В основу методов положена процедура обработки результатов парных сравнений относительных интенсивностей  $d_{ij}$  различных факторов (для индексов факторов использованы уже ранее примененные ранее индексы  $i$  и  $j$ , что не должно вызвать недоразумений).

Относительные величины  $d_{ij}$  предполагается определять, производя сопоставления интенсивностей различных факторов по достаточно *грубым* числовым шкалам. Специальные психофизические исследования показывают, что рациональным является использование 9-ти или 16-ти бальных шкал. Полученные основные выводы этих исследований могут быть сформулированы следующим образом.

1. Использование шкалы парных сравнений в диапазоне от 0 до бесконечности может оказаться бесполезным, так как предполагает, что человеческое суждение каким-то образом способно оценить относительное превосходство любых 2-х объектов, что совсем не так. Как хорошо известно из психофизического закона Вебера-Фехнера, способность человека различать находится в весьма ограниченном диапазоне, и когда имеется значительная несоразмерность между сравниваемыми объектами или действиями, человеческие предположения тяготеют к тому, чтобы быть произвольными, и обычно оказываются далекими от действительности. Это подтверждает мысль о том, что числовые шкалы должны иметь конечный

диапазон. Действительно, пределы должны быть довольно близкими в диапазоне, который отражает нашу действительную возможность производить относительные сравнения. Так как единица является естественным стандартом измерения, верхняя граница не должна быть слишком далека от нее, хотя и достаточно отдалена, чтобы иметь возможность различать факторы по важности.

2. Качественные различия значимы на практике и обладают элементом точности, когда величины сравниваемых предметов одного порядка или предметы близки относительно свойства, используемого для сравнения.

3. Способность человека производить качественные разграничения хорошо представима 5-ю определениями: равный, слабый, сильный, очень сильный и абсолютный. Можно принять компромиссные определения между соседними определениями, когда нужна большая точность. В целом требуется девять значений, и они могут быть хорошо согласованы; получаемая в результате 9-ти бальная шкала хорошо зарекомендовала себя на практике.

4. Практический метод, часто используемый для оценки отдельных предметов, заключается в классификации стимулов в трихотомию зон: неприятия, безразличия, принятия. Для более тонкой классификации в каждую из этих зон заложен принцип трихотомии — деление на низкую, умеренную и высокую степени. Таким образом, получается девять оттенков значимых особенностей.

5. Психологический предел  $7 \pm 2$  предметов при одновременном сравнении подтверждает, что если взять  $7 \pm 2$  отдельных предметов и если все они слегка отличаются друг от друга, то понадобится 9 точек, чтобы различить их.

6. Сравнения различных шкал показали, что рациональными являются шкалы 1-9 и  $2^{n/2}$  ( $2^0 = 1$ ,  $2^{0,5} = 1.414$ ,  $2^1 = 2$ ,  $2^{1,5} = 2.828$ ,  $2^2 = 4$ ,  $2^{2,5} = 5.657$ ,  $2^3 = 8$ ,  $2^{3,5} = 11.31$ ,  $2^4 = 16$ ), причем использование шкалы  $2^{n/2}$  иногда приводит к лучшим результатам.

Шкала 1-9 (табл.2.1) выделяется сама по себе. Это указывает на склонность человека приводить в соответствие оттенки чувств с числами 1...9. Некоторые даже предполагают, что это связано со свойствами человеческого мозга, которое некоторым образом связано с числом пальцев, хотя и неизвестно, что является каузальным фактором. При условии, что мозг может одновременно обработать  $7 \pm 2$  факторов, можно привести иерархическую декомпозицию больших матриц в кластеры такого размера, к которым шкала 1...9 еще может быть применена.

Экспертно сформированная матрица **D** парных сравнений имеет следующий вид:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & d_{12} & d_{13} & d_{14}...d_{1s} \\ 1/d_{12} & 1 & d_{23} & d_{24}...d_{2s} \\ 1/d_{13} & 1/d_{23} & 1 & d_{34}...d_{3s} \\ ..... \\ 1/d_{1s} & 1/d_{7s} & 1/d_{3s} & 1/d_{4s}...1 \end{pmatrix} \quad (1.26)$$

Естественно, что  $\mathbf{D}$  должна быть обратносимметричной матрицей, так как значимости каждого из двух факторов при сравнении в масштабах противоположного должны находиться в обратной зависимости:  $d_{ij} = 1/d_{ji}$ . Поэтому для всех  $i$ :  $d_{ii} = 1$ .

В идеальном случае при совершенных суждениях во всех сравнениях  $d_{ik} = d_{ij} \times d_{jk}$  для всех  $i, j, k$ ; при этом  $\mathbf{D}$  называется согласованной матрицей. Подобные матрицы образуются, когда сравнения основаны на точных измерениях. В общем случае может оказаться, что  $d_{ik} \neq d_{ij} \times d_{jk}$ , т.е. относительные суждения могут быть не согласованы друг с другом (не транзитивны). Необходимо отметить, что это не исключительный, а наоборот — наиболее типичный случай, который практически всегда встречается при решении практических задач.

Таблица 1.1

| Степень важности | Определение                                                                        | Объяснение                                                                                 |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                | Одинаковая значимость                                                              | Два действия вносят одинаковый вклад в достижение цели                                     |
| 3                | Некоторое преобладание значимости одного действия перед другим (слабая значимость) | Опыт и суждение дают легкое предпочтение одному действию перед другим                      |
| 5                | Существенная или сильная значимость                                                | Опыт и суждение дают сильное предпочтение одному действию перед другим                     |
| 7                | Очень сильная или очевидная значимость                                             | Предпочтение одного действия перед другим очень сильно. Его превосходство практически явно |
| 9                | Абсолютная значимость                                                              | Свидетельство в пользу предпочтения одного действия другому в высшей степени убедительно   |
| 2,4,6,8          | Промежуточные значения между соседними значениями                                  | Ситуация, когда необходимо компромиссное решение                                           |

Важно отметить, что числа, используемые в шкале, являются абсолютными величинами, а не просто порядковыми числами. Это позволит освободиться от проблем построения коллективного упорядочения, которые обозначены теоремой Эрроу.

В результате обработки подобных матриц, оказывается возможным

получить достаточно точные оценки относительных значимостей  $\rho_i$  ( $i = 1...s$ ) различных факторов. Очень часто эти оценки оказываются не только приемлемо точными, а удивительно точными.

Основная причина этого заключается в следующем. Поскольку

$$\sum_{i=1}^s \rho_i = 1, \quad (1.27)$$

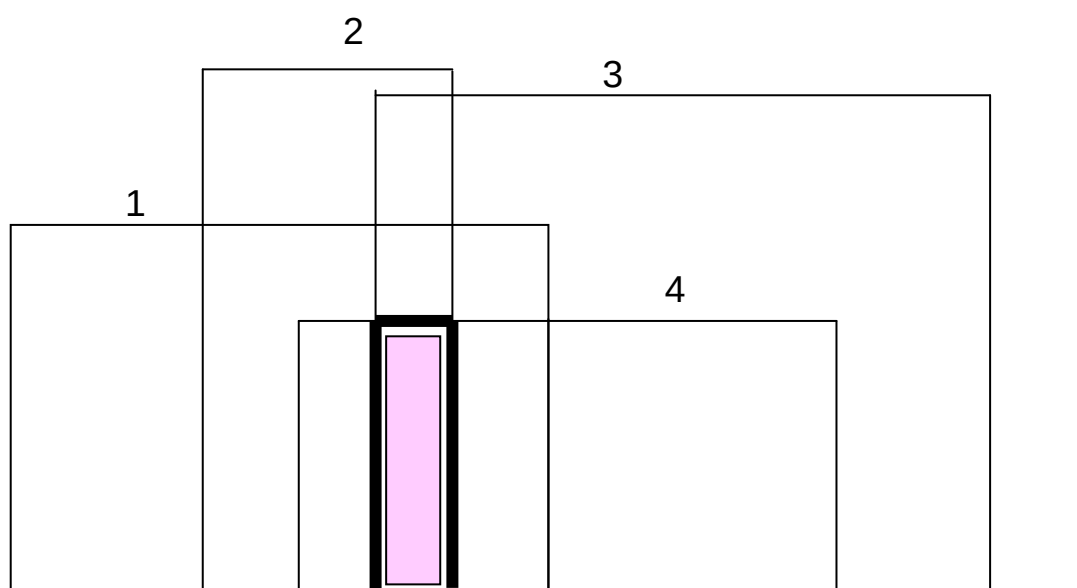
то количество независимых параметров  $\rho_i$  составляет  $s-1$ . С другой стороны, количество  $Q$  независимых элементов матрицы **D** может быть легко определено: оно равно сумме целых чисел от 1 до  $(s-1)$ , т.е.

$$Q = \frac{(s-1) \times s}{2}$$

Поэтому

$$Q - (s-1) = \frac{(s-2) \times (s-1)}{2}.$$

При  $s > 2$  количество независимых элементов матрицы **D** парных сравнений превышает количество независимых компонентов  $\rho_i$ , т.е. появляется дополнительная информация для уточнения  $\rho_i$ . Можно сказать, что относительные значимости измеряются как бы не одним, а совокупностью различных измерителей с разными масштабами (в разной системе измерений), что естественно повышает общую точность оценок величин  $\rho_i$  (рис.2.1)



Схема, поясняющая высокую точность метода парных сравнений  
(1-4 номера грубых измерителей)

рис. 1

Существуют несколько способов обработки матрицы **D** и получения вектора **p** значимостей с нормализованной на единицу суммой компонентов.

Существо метода собственного значения сводится к определению собственного вектора **p** из решения следующей задачи на собственное значение матричного оператора **D**:

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{p} = \lambda \times \mathbf{p}, \quad (1.28)$$

где  $\lambda$  — собственное значение задачи (1.28).

Реализация метода собственного значения предполагает применение некоторого алгоритма для определения  $\lambda$  и нормализованного вектора **p** значимостей. Невозможность получения аналитического решения — это его основной недостаток, поскольку использование алгоритма замедляет процесс решения задачи и делает его (решение) менее наглядным.

Можно предложить другой достаточно простой и, что очень важно, не менее точный метод определения компонентов вектора **p**, который, с одной стороны, допускает получение аналитического решения, а с другой — дает результаты, достаточно близкие (относительная точность — несколько процентов) по отношению к методу собственного значения.

В основу этого метода положено известное правило наименьшей суммы квадратов. Однако оно должно быть применено не к величинам  $d_{ij}$ , а к *логарифмам этих величин*, т.к. производится обработка результатов определения *относительных* значений.

Действительно, рассмотрим следующий пример. Пусть  $d_{12} = 10$ ;  $p_1 = 8$ ;  $p_2 = 1$ . В этом случае  $(d_{12} - p_1/p_2)^2 = 2^2 = 4$ ; в тоже время  $(d_{21} - p_2/p_1)^2 = 0,025^2 = 6,25 \times 10^{-4}$ . Поэтому, если минимизировать сумму квадратов отклонений, можно получить неправильный результат. Логичнее (и это находится в соответствии с законами Вебера и Фехнера) минимизировать сумму квадратов разности логарифмов

$$\ln(d_{ij}) - \ln(p_i/p_j)$$

Таким образом, приходим к следующей оптимизационной задаче. Определить

$$\sigma_o^2 \times s = \min_{i,j=1}^s \{ \sum [ \ln(d_{ij}) - \ln(p_i/p_j) ]^2 \} \quad (1.29)$$

при ограничении — равенстве



$$\sum_{i=1}^s \rho_i = 1$$

В этом случае слагаемые, соответствующие  $d_{ij}$  и  $d_{ji}$ , будут уже вносить одинаковый вклад в оптимизируемую функцию, как это и должно быть.

Результат решения (1.29) записан несколько необычно в виде  $\sigma_o^2 \times s$ . Это сделано специально для того, чтобы использовать  $\sigma_o$  для характеристики качества полученного решения.

Рассмотрим  $\rho_i = \rho_1$ . Очевидно, достаточно проанализировать случай, когда  $\rho_1$  находится только в числителе (1.29), так как слагаемые с  $\rho_1$  в знаменателе будут только дублировать соответствующие слагаемые с  $\rho_1$  в числителе. Ограничение-равенство учтем методом множителей Лагранжа. В итоге задача на безусловный экстремум сводится к решению следующей системы уравнений относительно  $\rho_i$ :

$$\sum_{j=1}^s [ \text{Ln}(d_{ij}) - \text{Ln}(\rho_i/\rho_j) ] = \lambda \times \rho_i ; \quad i = 1, \dots, s. \quad (1.30)$$

Складывая почленно соотношения данного типа для всех  $i$ , учитывая (1.27) и то, что  $\text{Ln}(d_{ij}) = -\text{Ln}(d_{ji})$ ,  $\text{Ln}(\rho_i/\rho_j) = -\text{Ln}(\rho_j/\rho_i)$ , получим  $\lambda = 0$ , т.е. система уравнений упрощается и приобретает вид:

$$\sum_{j=1}^s [ \text{Ln}(d_{ij}) - \text{Ln}(\rho_i/\rho_j) ] = 0 . \quad (1.31)$$

Система (1.31) имеет решение

$$\text{Ln}(\rho_i) = \text{Ln}(\Omega) + \{ \sum_{j=1}^s \text{Ln}(d_{ij}) \} / s ,$$

где  $\Omega$  — положительная константа. Действительно:

$$\sum_{j=1}^s \text{Ln}(\rho_i) = s \times \text{Ln}(\rho_i),$$

$$\sum_{j=1}^s \text{Ln}(\rho_i) = s \times \text{Ln}(\Omega), \quad \text{поскольку} \quad \sum_{j,k=1}^s \text{Ln}(d_{jk}) = 0$$

$$\rho_i = \Omega \times \{ \prod_{j=1}^s d_{ij} \}^{1/s}$$

Константа  $\Omega$  определяется из условия нормировки (1.27). Окончательно получаем:

$$\rho_i = \frac{\{ \prod_{j=1}^s d_{ij} \}^{1/s}}{\sum_{r=1}^s \{ \prod_{j=1}^s d_{rj} \}^{1/s}} \quad (1.31)$$

Таким образом, имеем наглядный результат: относительные значимости пропорциональны средним геометрическим элементов матрицы **D** парных сравнений, расположенных на каждой строке. Очень важно, что для него можно получить *аналитическое* выражение, а не применять какой-либо алгоритм типа решения задачи на собственные значения линейного оператора.

Математически строгого взаимоотношения между решениями, полученными с помощью собственного значения, и решениями, полученными методом наименьших квадратов, не существует. Но, как было отмечено выше, численные эксперименты показывают, что оба эти метода приводят к очень близким решениям.

Заметим, что в модифицированном методе наименьших квадратов аналогом показателя близости к согласованности является величина  $\sigma_0$ .

Будем далее определять нормализованный вектор  $\rho$  собственных значений, ориентируясь на модифицированный метод наименьших квадратов, т.е. по соотношению (1.32).

Методы парных сравнений принадлежат к классу экспертных (эвристических методов). Поэтому определить их точность и сравнить ее с точностью других методов (формальных или экспертных) формальными способами *невозможно*.

Остается один путь — разработать различные тестовые задачи, решения которых известны (например, они могут быть получены из справочной литературы), и на них апробировать данные методы.

Ниже приводятся результаты еще двух тестов. Рассматриваются задачи оценки национальных богатств и площади территорий десяти стран. Соответствующие матрицы парных сравнений представлены в таблицах 1.2 и 1.3. Экспертом заполнялись только ячейки таблиц, расположенные выше главных диагоналей, так как по этим данным величины в нижних ячейках устанавливаются однозначно. Парные сравнения проводились при

использовании шкалы 1-9.

При обработке соответствующих матриц по формуле (2.32) получаем два вектора, компоненты которых представлены в первых столбцах табл. 1.4 и табл.1.5.

Таблица 1.2

| Страна    | Австралия | Аргентина | Бразилия | Индия | Казахстан | Канада | Китай | Россия | Судан | США   |
|-----------|-----------|-----------|----------|-------|-----------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Австралия | 1         | 3         | 2        | 1,5   | 1,5       | 1,5    | 0,8   | 1/3    | 7     | 1     |
| Аргентина | &         | 1         | 2/3      | 1/5   | 1/5       | 1/5    | 1/5   | 1/9    | 1     | 1/5   |
| Бразилия  | &         | &         | 1        | 2/3   | 1         | 1/2    | 1/2   | 1/5    | 2     | 2/5   |
| Индия     | &         | &         | &        | 1     | 1         | 1/1,2  | 1/2   | 1/5    | 2     | 2/5   |
| Казахстан | &         | &         | &        | &     | 1         | 1/1,3  | 1/1,2 | 1/7    | 1/4   | 1/2   |
| Канада    | &         | &         | &        | &     | &         | 1      | 1     | 1/4    | 8     | 1/1,2 |
| Китай     | &         | &         | &        | &     | &         | &      | 1     | 1/4    | 6     | 1/1,2 |
| Россия    | &         | &         | &        | &     | &         | &      | &     | 1      | 9     | 2     |
| Судан     | &         | &         | &        | &     | &         | &      | &     | &      | 1     | 1/9   |
| США       | &         | &         | &        | &     | &         | &      | &     | &      | &     | 1     |

Таблица 1.3

| Страна         | Бразилия | Великобритания | Германия | Индия | Италия | Китай | Россия | США | Франция | Япония |
|----------------|----------|----------------|----------|-------|--------|-------|--------|-----|---------|--------|
| Бразилия       | 1        | 1              | 1/2      | 1/2   | 1      | 1/3   | 1      | 1/9 | 1/2     | 1/3    |
| Великобритания | &        | 1              | 1/2      | 1     | 1      | 1/2   | 1      | 1/6 | 1       | 1/3    |
| Германия       | &        | &              | 1        | 1     | 1      | 1     | 2      | 1/5 | 1       | 1/2    |
| Индия          | &        | &              | &        | 1     | 1      | 1/2   | 1      | 1/7 | 1       | 1/2    |
| Италия         | &        | &              | &        | &     | 1      | 1/2   | 1      | 1/6 | 1       | 1/3    |
| Китай          | &        | &              | &        | &     | &      | 1     | 2      | 1/3 | 2       | 1      |
| Россия         | &        | &              | &        | &     | &      | &     | 1      | 1/7 | 1       | 1/3    |

| Страна  | Бразилия | Великобритания | Германия | Индия | Италия | Китай | Россия | США | Франция | Япония |
|---------|----------|----------------|----------|-------|--------|-------|--------|-----|---------|--------|
|         |          |                |          |       |        |       |        |     |         |        |
| США     | &        | &              | &        | &     | &      | &     | &      | 1   | 6       | 3      |
| Франция | &        | &              | &        | &     | &      | &     | &      | &   | 1       | 1/2    |
| Япония  | &        | &              | &        | &     | &      | &     | &      | &   | &       | 1      |

Во вторых строках этих таблиц представлены *действительные* относительные величины указанных факторов — национального богатства (валового внутреннего продукта) и площади территорий стран, а в третьих строках указанных таблиц — их абсолютные значения).

Таким образом, результаты проведенного тестирования, несмотря на грубость примененной для оценок числовой шкалы, оказались достаточно хорошо совпадающими с реальными значениями соответствующих параметров. Это произошло потому, что общее количество независимых  $\rho_i$  составляло 9, в то время как количество произведенных парных сравнений 45. Таким образом, каждый независимый фактор как бы измерялся 5-ю независимыми масштабами. Многократность измерений и явилась основной причиной получения хорошей общей точности.

Основываясь на этих, а также других многочисленных примерах, можно сделать следующий вывод: эксперты достаточно *хорошо*, хотя может быть, и не всегда осознано для самих себя, *представляют реальное распределение* относительных значимостей различных факторов.

Таблица 1.4

| Страна    | $\rho_i$<br>экспертное | $\rho_i$<br>действительное | S территории,<br>км <sup>2</sup> |
|-----------|------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Австралия | 0,11                   | 0,104                      | 7,69                             |
| Аргентина | 0,024                  | 0,038                      | 2,78                             |
| Бразилия  | 0,053                  | 0,118                      | 8,51                             |
| Индия     | 0,069                  | 0,045                      | 3,29                             |
| Казахстан | 0,055                  | 0,037                      | 2,72                             |
| Канада    | 0,102                  | 0,136                      | 9,98                             |
| Китай     | 0,11                   | 0,13                       | 9,6                              |
| Россия    | 0,314                  | 0,231                      | 17,08                            |
| Судан     | 0,028                  | 0,034                      | 2,51                             |
| США       | 0,136                  | 0,127                      | 9,36                             |

Задача системных аналитиков заключается только в проявлении уже имеющейся у экспертов информации. Логично предположить, что этот вывод

также распространяется на экспертов, оценивающих относительные уровни значимости различных регионов и различных типов ВВТ.

До сих пор рассматривались только методы обработки результатов парных сравнений и еще ничего не было сказано об анализе иерархий. Зачем они вообще нужны?

Таблица 1.5

| Страна                | $\rho_i$ ,<br>экспертное | $\rho_i$ ,<br>действительное (по<br>ППС) |
|-----------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| Бразилия              | 0,041                    | 0,046                                    |
| <b>Великобритания</b> | 0,051                    | 0,055                                    |
| <b>Германия</b>       | 0,076                    | 0,078                                    |
| <b>Индия</b>          | 0,057                    | 0,059                                    |
| <b>Италия</b>         | 0,055                    | 0,057                                    |
| <b>Китай</b>          | 0,11                     | 0,106                                    |
| <b>Россия</b>         | 0,05                     | 0,046                                    |
| <b>США</b>            | 0,359                    | 0,352                                    |
| <b>Франция</b>        | 0,061                    | 0,06                                     |
| <b>Япония</b>         | 0,139                    | 0,141                                    |

Формирование матрицы парных сравнений при решении практических задач может оказаться затруднительным по причине большого необходимого количества учитываемых факторов (требуемое количество независимых сравнений увеличивается с размерностью  $s$  матрицы **D** примерно как  $s^2$ ), их значительного отличия друг от друга и неконкретности. Как уже указывалось, элементы должны быть сгруппированы в кластеры, в пределах каждого из которых они сравнимы по этой шкале, а кластеры, в свою очередь, также должны сравниваться по той же шкале. Заметим, что может возникнуть необходимость создания промежуточных кластеров для проведения относительных сравнений, идущих от кластера с наименьшими по весам (или слабейшими) элементами к кластеру с наибольшим по весам (или сильнейшими) элементами. *Это естественный путь, а не изобретение ради теории* (выделено нами). Мы не можем непосредственно сравнивать массу песчинки с массой Солнца — нужен постепенный переход»

Таким образом, приходим к необходимости *анализа иерархий*. Его схема следующая.

Сначала рассмотренными выше методами могут быть установлены относительные значимости кластеров на различных системных уровнях, а затем решена исходная задача с выходом на относительные уровни значимости первичных факторов.

Придание сложной задачи иерархической формы посредством

группировки всех или части факторов в кластеры имеет, по крайней мере, 4 преимущества перед обычной схемой парных сравнений.

1. Большая эффективность при проведении парных сравнений (эффективность иерархии).

2. Большая согласованность при условии ограниченной способности человеческого мозга сравнивать больше, чем  $7 \pm 2$  элементов (кластеров) одновременно.

3. Возможность сформулировать экспертный вопрос более конкретно, что предполагает получение потенциально более точного на него ответа.

4. Возможность привлечения большой группы экспертов (различного системного уровня) для проведения полной и всесторонней экспертизы: действительно трудно представить, что один эксперт окажется компетентным при формировании суждений по всей глубине рассматриваемой проблемы. Обычные эксперты — это специалисты только одного-двух системных уровней. Поэтому построение многоуровневой иерархии необходимо для повышения качества экспертизы на всю ее глубину.

Следует заметить, что иерархию можно построить не единственным образом. Чем конкретнее удастся обозначить ее элементы, тем потенциально более точно возможно получить решение задачи.

Для оценки потенциальной эффективности Э совершенной иерархии предположим, что имеется множество из  $s$  элементов. Если требуется попарно сравнить элементы для получения оценок в шкале отношений, то необходимо провести  $(s^2-s)/2$  суждений, чтобы решить задачу одним из предложенных выше методом. Допустим теперь, что  $k$  — максимальное число элементов, которые могут быть сравнимы с какой-либо достаточно разумной (психологической) уверенностью в согласованности. Тогда  $s$  должно быть, во-первых, разделено на эквивалентные классы, каждый из которых содержит не более, чем  $k$  кластеров или подмножеств. В свою очередь, каждый из них должен быть разделен на  $k$  новых кластеров и т.д., образуя уровни иерархии до тех пор, пока не получится окончательная декомпозиция, при которой каждое из множеств будет иметь не более, чем  $k$  образующих элементов.

*Теорема.* Максимальное число сравнений после декомпозиции множества  $s > 1$  элементов в иерархию кластеров (при условии, что одновременно сравниваются не более  $k$  элементов) ограничено величиной  $(k/2) \times (s - 1)$ , и это точная граница.

*Доказательство.* Для максимального числа сравнений на каждом уровне мы должны иметь на  $h$ -ом или последнем уровне, по крайней мере,  $k$  элементов в каждом кластере.

1 0,

$$2 \quad k \times (k-1)/2,$$

$$3 \quad k \times k \times (k-1)/2,$$

·

·

·

$$h \quad k^{h-2} \times k \times (k-1)/2$$

Сумма  $N$  этих отношений с учетом того, что  $k^{h-1} = s$ , будет составлять

$$\begin{aligned} N &= (1 + k + k^2 + \dots + k^{h-2}) \times k \times (k-1)/2 = \\ &= (k^{h-1} - 1) \times (k-2)/2 = (s-1) \times k/2. \end{aligned}$$

*Замечание.* Здесь представлен анализ общего случая.

Тогда величина  $\mathcal{E}$  может быть определена как отношение числа прямых парных сравнений, требуемых для всего множества  $s$  элементов, входящих в иерархию, к числу парных сравнений, которые необходимо провести после группирование в кластеры.

$\mathcal{E}$  имеет порядок  $(s/k)$ : для установления этого факта достаточно сравнить  $s \times (s-1)/2$  с  $(s-1) \times k/2$ .

Естественно, может возникнуть вопрос, почему не использовать 2 вместо 7 для большей эффективности. Заметим, что, применяя иерархию, мы стремимся к согласованности, в то же время соответствие реальности тем больше, тем больше размеры матрицы, так как используется дополнительная информация. Поэтому здесь нужен компромисс. Действительно, используя индекс согласованности, показано, что число 7 является хорошей практической границей для  $s$ , поскольку позволяет учесть согласованность.

Допустим, имеется множество из 98 элементов, которым мы хотим приписать приоритеты. Проведем декомпозицию задачи на 7 множеств, каждое из которых состоит в среднем из 14 элементов. Мы не можем сравнить 14 элементов, поэтому каждое из этих множеств разделим на 2, в каждом из которых не более 7 элементов. Затем мы сравним элементы друг с другом.

Для 98 элементов потребовалось бы  $97 \times 98/2 = 4753$  сравнения друг с другом. С другой стороны, если разделить их на 7 кластеров с 14 элементами для каждого, а затем провести парные сравнения семи кластеров, то понадобится  $6 \times 7/2 = 21$  сравнения. Каждый кластер теперь может быть разделен на 2 кластера, в каждом из которых будет 7 элементов. Суждение о 2-х кластерах, каждый из которых попадает в 14 элементный кластер, требует одного сравнения, но таких пар 7, и поэтому на этом уровне требуется 7 сравнений; затем нужно  $14 \times 21 = 294$  сравнений на самом нижнем уровне. Общее число сравнений этой иерархии будет  $21 + 7 + 294 = 322$  против 4753 сравнений в том случае, когда группирование в кластеры нет. Действительно, теорема удовлетворяется, так как  $322 < 4753/7$ .

После всего изложенного становится понятным, почему методы парных сравнений и анализа иерархий могут обеспечить восстановление только линейных функций полезности. Действительно, по содержащейся в матрицах парных сравнений информации можно определить относительные значимости («веса») различных факторов при их конкретных значениях. Но как изменятся эти значимости при изменении величин факторов, мы не знаем, у нас нет относительно этого никаких дополнительных данных. Поэтому мы вынуждены предполагать, что установленные величины «весов» останутся неизменными.

В пространстве факторов значения «весов» пропорциональны косинусам углов, образованных радиусом-вектором с нормальями к некоторой поверхности, форма которой определяется функциональной связью между многомерной функцией полезности и ее одномерными составляющими. Так как величины «весов» неизменны, то эта функция определяет некоторую плоскость в пространстве соответствующего количества измерений. Или, говоря другими словами, многомерная функция полезности оказывается линейной функцией рассматриваемой системы факторов.

Таким образом, применение методов парных сравнений для установления параметров целевой функции — показателя качества Программы вооружения — в задаче (2.21)-(2.25) может оказаться достаточно эффективным, особенно в сочетании с построением и анализом иерархий.



## Выводы

1. В настоящей работе под Программой вооружения понимается целостная система мероприятий по организации и проведению НИОКР по оборонной тематике, серийному производству ВВТ, капитальному строительству, а также — по материально-техническому обеспечению и повышению мобилизационной подготовки.

2. В государстве с развитой экономикой, в котором производящие вооружение фирмы выступают, как самостоятельные и независимые экономические агенты, основной задачей заказывающих вооружение органов Министерства обороны является формирование рационального плана закупок ВВТ. Для его реализации необходимо обеспечить выравнивание военно-технических потенциалов различных типов ВВТ.

3. Если экономика и рыночные отношения в стране развиты в недостаточной степени, то государство обязано дополнительно заботиться о благополучном или, по крайней мере — приемлемом, экономическом существовании и развитии важных оборонных производств. Поэтому заказывающие органы Министерства обороны должны вникать в суть технической политики производящих вооружение фирм, в частности участвовать в определении перспектив разработки и создания нового вооружения. Таким образом, целесообразность (или наоборот — нецелесообразность) разработки новых комплексов (образцов) ВВТ перестает быть внутренним делом фирмы и становится задачей государственной важности. В этом случае заказывающие вооружение органы уже должны не только формировать планы закупок ВВТ, но и разрабатывать значительно более сложную систему мероприятий по организации разработки новой военной техники, ее закупкам, ремонту и утилизации. Планы реализации этих мероприятий имеют специальное название — Программы вооружения.

4. Для того, чтобы создание нового вооружения было оправданным с военно-экономической точки зрения, необходимо, чтобы его эффективность (полезность) превышала некоторое критериальное значение, зависящее от экономических характеристик производства и ремонта старого и нового вооружения, а также от стоимости НИОКР, или же (другая эквивалентная формулировка необходимого критериального условия) суммарная стоимость создания и ремонта ВВТ в течение планового периода была бы ниже некоторой величины, зависящей от соотношения показателей эффективности (полезности) нового и старого вооружения.

5. Но эти необходимые условия еще не являются достаточными. Для исчерпывающего ответа на вопрос о целесообразности разработки и создания нового вооружения необходимо проанализировать весь процесс создания не только в каждый отдельный момент времени, а рассматривать его временную

развертку, проверяя в каждый момент выполнение различных дополнительных условий и ограничений. В первую очередь необходимо учитывать динамику военных угроз, которая определяет спрос на вооружение, а также возможные временные изменения общего финансирования всей программы развития вооружения.

6. Вид показателя качества Программы вооружения может быть установлен методами теории полезности при анализе структуры полезности, зависящей от времени с точностью до некоторой функции от времени. Ее определение осуществляется при рассмотрении частного случая, когда прошлые и будущие потоки ресурсов взаимонезависимы по полезности.

7. Для формирования обобщенного показателя, определяющего качество Программы вооружения, вводится в рассмотрение новое понятие о техническом потенциале одного типа ВВТ, который является линейной функцией количеств четырех поколений средств ВВТ данного типа. Кроме этого, вводится также понятие об обобщенном техническом потенциале, как многомерной функции полезности целостной совокупности средств и систем ВВТ. Эта функция указывает на существование альтернативных возможностей в развитии системы вооружения. Но если возможны различные варианты развития, совместимые с заданными ресурсными ограничениями, то значит должен существовать и оптимальный вариант.

8. В качестве показателя качества Программы вооружения далее рассматривается величина обобщенного технического потенциала, усредненная с некоторым «весовым» фактором на временном интервале  $[0, T]$ , где  $T$  — ожидаемое время возникновения военного конфликта с вероятностью, близкой к единице. Поэтому мы приходим к задаче с определенным временным горизонтом. Величина «веса» фактора зависит от плотности  $\varphi(t)$  вероятности возникновения военного конфликта и коэффициента дисконтирования. Функция  $\varphi(t)$  в настоящей работе рассматривается в качестве формализованных исходных данных о военной угрозе.

9. Для вычисления значений показателя качества Программы вооружения может быть применен матричный метод, позволяющий построить простой и надежный алгоритм в случае наличия нескольких районов предполагаемых боевых действий. В каждом из этих районов формируется свой спрос на ВВТ. Наличие показателя качества позволяет осуществить проверку реализуемости различных вариантов Программы вооружения.

10. Формульное выражение для показателя качества может рассматриваться как формализация плана дальнейших исследований по обоснованию целевых установок, стоящих перед разработчиками Программы вооружения. Оно указывает путь декомпозиции проблемы определения интегрального показателя качества программного планирования на ряд менее

сложных и более понятных вопросов, каждый из которых также потребует своего решения.

11. Величина показателя качества зависит от совокупности параметров, которыми разработчики Программы вооружения могут в определенных пределах распоряжаться по своему усмотрению, например, выбирать их таким образом, чтобы получить максимальный эффект при реализации всей Программы. Поэтому представляется вполне логичным сформулировать задачу синтеза Программы вооружения как соответствующую оптимизационную задачу (задачу математического программирования), в которой в качестве целевой функции выступает установленный показатель качества Программы вооружения.

12. Для установления некоторых параметров целевой функции — показателя качества Программы вооружения — могут быть применены экспертные методы парного сравнения интенсивностей значимых факторов в сочетании с анализом соответствующей иерархии.