

*Кандидат технических наук, доцент
Кравченко А.Ю.; кандидат технических
наук, доцент Котов М.А.; Сергеев А.В.*

Методический подход к определению рационального состава участников проектов по созданию наукоемких изделий с долевым участием иностранных заказчиков

В материалах статьи изложен методический подход к определению рационального состава участников проектов по созданию наукоемких изделий с долевым участием иностранных заказчиков на основе задачи многокритериального выбора наиболее предпочтительного варианта разделения состава частей проекта. В качестве метода решения задачи предложен метод многокритериального потокового ранжирования, позволяющий на основе типового набора критериев получить количественные оценки приоритетности оцениваемых вариантов. Предлагаемый подход обеспечивает учет высокого уровня неопределенности исходных данных задачи, предоставляя возможность выделения нескольких концептуально значимых вариантов долевого участия предприятий инозаказчика в разработке изделия. Разработанный методический подход может быть использован на этапах предварительной проработки состава участников и распределения работ по созданию наукоемких изделий в рамках совместных с инозаказчиками проектов.

Создание современных технических изделий – сложный многоэтапный процесс, требующий не только интеграции знаний в области различных фундаментальных наук и прикладных дисциплин, но и вложения серьезных инвестиций в процесс, который зачастую не под силу даже многим высоко развитым в экономическом и научно-техническом отношении государствам.

Анализ зарубежного опыта по созданию перспективных систем (комплексов) показал общую тенденцию по формированию ведущими мировыми производителями различных форм кооперации при разработке (модернизации) современных технических систем [1]. Применение таких коопераций позволяет высвободить как временные ресурсы, так и оптимизировать финансовые затраты при создании современных систем вооружения.

Однако в целом, механизмы создания наукоемких изделий на долевого основе, в том числе, с привлечением иностранных исполнителей, в России используются еще недостаточно эффективно. Это связано, прежде всего, с неразвитостью научно-методической базы выполнения совместных проектов, несовершенством нормативно-правовых документов, четко регламентирующих деятельность участников совместных работ по созданию сложных систем, наличием существенных проблем по осуществлению информационного взаимодейст-

вия заказчиков, разработчиков и производителей. Для эффективной организации работ по созданию технической продукции на долевого основе необходимо решение целого комплекса задач, связанных с определением рациональных путей объединения финансовых, научных, трудовых и производственных ресурсов заказчиков и производителей, а также разработкой информационно-аналитического обеспечения этих процессов, что и обусловило актуальность настоящей статьи.

В качестве основы для разработки методического подхода к определению рационального состава участников проектов по созданию наукоемких изделий с долевым участием иностранных заказчиков целесообразно использовать задачу многокритериального выбора наиболее предпочтительного варианта разделения состава частей проекта между отечественными предприятиями и предприятиями инозаказчика.

Для наглядности задача выбора оптимального состава участников и распределения работ по созданию изделий в рамках совместных проектов может быть представлена с помощью структурной функционально-технологической схемы [2].

Пусть имеется структурная функционально-технологическая схема (СФТС) создаваемого изделия (рисунок 1), позволяющая обеспечить единство понимания различными специалистами его структурных,



функциональных и технологических особенностей, а также заданы основные требо-

вания и объем финансовых средств, выделяемых на разработку.

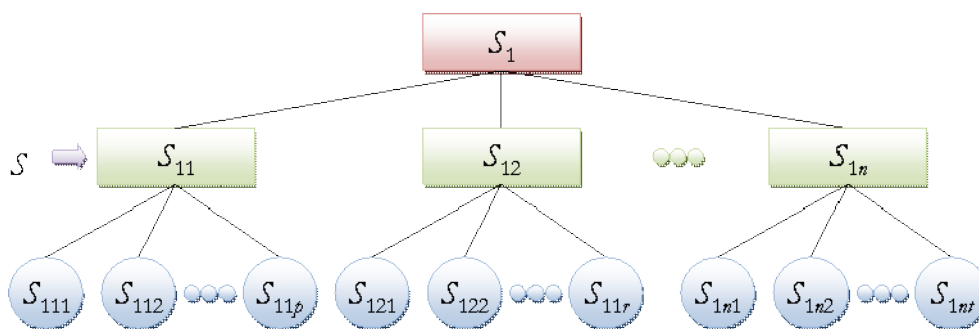


Рисунок 1 – Структурная функционально-технологическая схема создаваемого изделия

Этой структурной функционально-технологической схеме поставим в соответствие матрицу, по числу строк равную количеству выделенных в СФТС уровней разукрупнения (обычно это три основных уровня).

Количество элементов матрицы будет соответствовать максимальному суммарному количеству элементов, выделенных на нижнем уровне (как правило, общее число элементов СФТС не превышает 49 элементов, если при построении схемы пользоваться числом Миллера, равным $5 \div 7$ [3]).

Таким образом, любая трехуровневая СФТС может быть описана матрицей $M(S)$ максимального размера 3×49 .

Любой вариант распределения составных частей проекта между отечественными предприятиями и предприятиями инозаказчика может быть описан с помощью матрицы $M(S)$ размера 3×49 , состоящей из нулей, единиц и двоек (принципиально могут применяться и другие знаки для обозначения элементов, т.к. в данном случае используется шкала наименований).

Таким образом,

$$M(S) = \|m_{ij}\|, \quad i = \overline{1,3}; \quad j = \overline{1,49}$$

где $m_{ij} = 0$, если ij -й элемент изделия отсутствует в СФТС;

$m_{ij} = 1$, если ij -й элемент изделия создается отечественными предприятиями;

$m_{ij} = 2$, если ij -й элемент изделия создается предприятиями инозаказчика.

Для сравнения вариантов создания изделия, отличающихся долей участия предприятий инозаказчика, может быть сформирован типовой набор критериев.

В качестве основы предлагаются следующие критерии:

1) доля потребных суммарных средств, вкладываемых в разработку инозаказчиком;

2) обеспеченность варианта отечественным научно-техническим заделом (НТЗ);

3) уровень надежности и ремонтпригодности;

4) обеспеченность отечественными материалами и комплектующими изделиями (КИ);

5) вероятность несанкционированного распространения критических технологий (КТ);

6) доля отечественной интеллектуальной собственности (ИС);

7) степень освоения передовых иностранных технологий;

8) уровень занятости персонала в разработке изделия;

9) сроки создания изделия.

По результатам оценки вариантов распределения составных частей проекта между отечественными предприятиями и предприятиями инозаказчика получим матрицу оценки вариантов многокритериальной задачи $MOMZ$ размера $k \times 1$. При этом часть оценок может быть получена экспертным путем, а часть – на основе расчетов.

$$\begin{array}{c}
 \text{МММЗ} = \\
 \text{Варианты} \left\{ \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} M(S(1)) & G_{11}(M(S(1))) & G_{12}(M(S(1))) & \dots & G_{1l}(M(S(1))) \\ M(S(2)) & G_{21}(M(S(2))) & G_{22}(M(S(2))) & \dots & G_{2l}(M(S(2))) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ M(S(k)) & G_{k1}(M(S(k))) & G_{k2}(M(S(k))) & \dots & G_{kl}(M(S(k))) \end{array} \right] \end{array} \right\}, \\
 \text{Критерии}
 \end{array}$$

где $G_{ij}(M(S(i)))$ – оценка i -го варианта по j -му критерию,

$$i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, l},$$

k – количество вариантов распределения составных частей проекта между оте-

$$\text{Opt}_{(P, I)} \{ G_{i1}(M(S(i))), G_{i2}(M(S(i))), \dots, G_{il}(M(S(i))) \mid M(S(i)) \in M^*(S) \}$$

где $M^*(S) = \{M(S(1)), M(S(2)), \dots, M(S(k))\}$ – множество оцениваемых вариантов,

$G = \{G_1, G_2, \dots, G_l\}$ – множество критериев оценки вариантов,

P – бинарное отношение предпочтения, т.е. $M(S(i)) P M(S(j))$, если $M(S(i))$ предпочтительнее $M(S(j))$;

I – бинарное отношение неразличимости, т.е. $M(S(i)) I M(S(j))$, если $M(S(i))$ неразличимо с $M(S(j))$.

В результате решения данной задачи на множестве сравниваемых вариантов $M^*(S)$ должны быть установлены бинарные отношения предпочтения P и неразличимости I .

При построении этих отношений P и I оптимальным образом (смысл знака Opt) должна быть использована информация об оценках вариантов по отдельным критериям и учтена система предпочтений экспертов.

Не совсем правильно было бы ограничиться выбором одного наилучшего варианта, так как исходные данные задачи содержат высокий уровень неопределенности.

В процессе решения данного класса задач необходимо отобрать несколько концептуально значимых вариантов и предложить лицу, принимающему решения, для выбора с учетом анализа содержательного характера.

Для решения подобных задач разработан целый класс методов многокритериального выбора и упорядочения.

ественными предприятиями и предприятиями заказчика,

l – количество критериев.

Таким образом, в целом формально задача может быть записана как задача многокритериальной оптимизации следующим образом:

Воспользуемся для решения задачи многокритериального выбора наиболее предпочтительного варианта разделения состава частей проекта между отечественными и иностранными предприятиями хорошо зарекомендовавшим себя на практике методом многокритериального потокового ранжирования.

Приведем краткое описание метода.

Метод представляет собой новую вариацию метода PROMETHEE [4] (Preference Ranking Organization METHod of Enrichment Evaluations) с расширенным набором типовых функций сравнения объектов. Он рекомендуется для решения задач многокритериального выбора и упорядочения объектов, когда приоритетность объектов определяется на основе обобщения количественных показателей объектов и экспертных данных.

Метод многокритериального потокового ранжирования позволяет на дискретном множестве вариантов, характеризуемых необходимым набором оценок критериев их качества, установить отношение полного квазипорядка, то есть в результате решения все оцениваемые варианты упорядочиваются на числовой оси предпочтительности.

В данном методе результат сравнения двух вариантов $a_j \in A$ и $a_k \in A$ выражается в терминах предпочтения. Для этого вводится в рассмотрение функция предпочтения

$$P: A \times A \rightarrow [0, 1],$$



описывающая интенсивность предпочтения варианта a_j по отношению к варианту a_k , таким образом, что

$P(a_j, a_k) = 0$ – означает неразличимость вариантов a_j и a_k ;

$P(a_j, a_k) \approx 0$ – означает слабое предпочтение варианта a_j над вариантом a_k ;

$P(a_j, a_k) \approx 1$ – означает существенное предпочтение варианта a_j над вариантом a_k ;

$P(a_j, a_k) = 1$ – означает явное предпочтение варианта a_j над вариантом a_k .

Эта функция предпочтения является функцией разности критериальных оценок двух вариантов:

$$P(a_j, a_k) = P[g(a_j) - g(a_k)].$$

График такой функции представлен на рисунке 2.

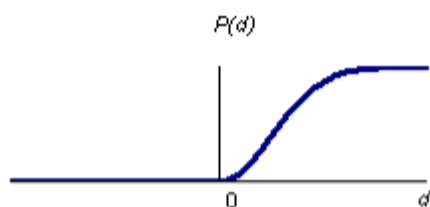


Рисунок 2 – График функции $P(d)$

При применении метода нет необходимости в построении функций предпочтения. Создатели метода провели специальные исследования, которые позволяют утверждать, что для решения большинства практических задач можно использовать ограниченный набор типовых функций предпочтения. Из

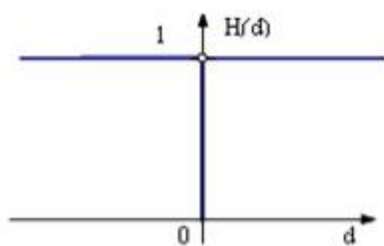


Рисунок 4 – Функция явного предпочтения

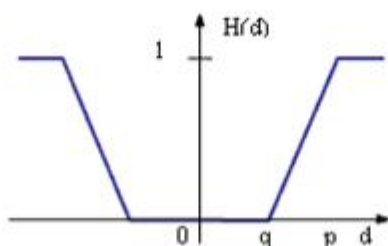


Рисунок 5 – Функция с областями линейного предпочтения и неразличимости

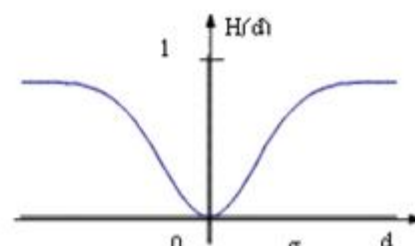


Рисунок 6 – Функция Гаусса

Работу данного метода можно разбить на следующие шаги:

Шаг 1. Выбор типа функций предпочтения и задание их параметров по каждому из критериев.

Обозначим $d(a_j, a_k) = g(a_j) - g(a_k)$.

Таким образом, функция предпочтения $P(d)$ является неубывающей и равной нулю при $d(a_j, a_k) \leq 0$. Для каждого критерия вид функции $P(d)$, должен выбираться так, чтобы наилучшим образом учитывались особенности оценки по данному критерию.

Для того, чтобы учесть знак разности $d(a_j, a_k)$, вводится в рассмотрение функция $H(d)$, связанная с функцией предпочтения $P(d)$ следующим образом:

$$H(d) = \begin{cases} P(d), & \text{при } d(a_j, a_k) \geq 0, \\ -P(d), & \text{при } d(a_j, a_k) < 0. \end{cases}$$

График функции $H(d)$ представлен на рисунке 3.

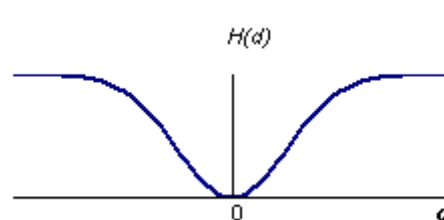


Рисунок 3 – График функции $H(d)$

их числа необходимо выбрать по одной функции для сравнения вариантов по каждому критерию и назначить значения параметров этих функций.

Пример типовых функций приведен на рисунках 4-6.

Шаг 2. Определение матриц парных сравнений вариантов по каждому из критериев.

Шаг 3. Расчет матрицы индексов многокритериального предпочтения и построение взвешенного графа предпочтений.

Каждый элемент этой матрицы определяется по формуле

$$H(a_j, a_k) = \sum_{i=1}^m w_i H_i(a_j, a_k), \quad j, k = \overline{1, n},$$

где $H_i(a_j, a_k)$ – элемент матрицы парных сравнений вариантов по i -му показателю;

w_i – коэффициент относительной важности i -го критерия.

Индекс многокритериального предпочтения характеризует интенсивность предпочтения варианта a_j по отношению к варианту a_k одновременно по всем критериям. Этот индекс – положительное число в интервале от 0 до 1, причем, чем ближе величина индекса предпочтения к 1, тем вариант a_j считается более предпочтительным, чем вариант a_k .

Используя матрицу индексов многокритериального предпочтения, можно построить граф предпочтений, вершинам которого соответствуют рассматриваемые варианты. Между вершинами этого графа a_j и a_k

имеются по две дуги с весами соответственно $H(a_j, a_k)$ и $H(a_k, a_j)$ как это показано на рисунке 7.

Шаг 4. Расчет исходящих потоков.

Для каждой из вершин графа предпочтений рассчитывается величина

$$\Phi^+(a_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1, k \neq j}^n H(a_j, a_k), \quad j = \overline{1, n},$$

называемая исходящим потоком. Эта величина является мерой превосходства варианта a_j над всеми остальными. Величина исходящего потока является суммой всех весов, стоящих на исходящих из вершин a_j дугах (рисунок 8).

Шаг 5. Расчет входящих потоков.

Величины входящих потоков определяются также для каждой вершины графа предпочтений (рисунок 9).

$$\Phi^-(a_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1, k \neq j}^n H(a_k, a_j), \quad j = \overline{1, n}$$

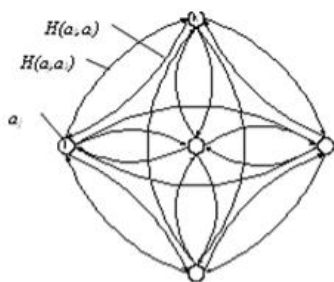


Рисунок 7 – Взвешенный граф предпочтений

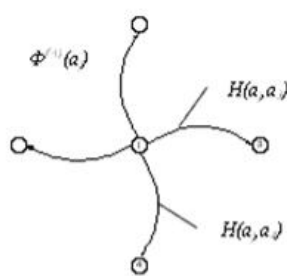


Рисунок 8 – Исходящие потоки для a_j

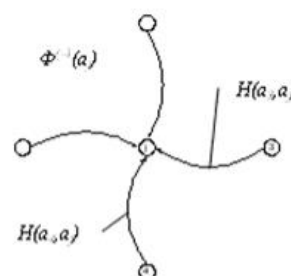


Рисунок 9 – Входящие потоки для a_j

Эта величина является мерой того, насколько вариант a_j уступает всем остальным оцениваемым вариантам.

Шаг 6. Расчет суммарных потоков.

Для каждой вершины графа предпочтений, а, следовательно, и для каждого оцениваемого варианта рассчитывается величина

$$\Phi(a_j) = \Phi^+(a_j) - \Phi^-(a_j), \quad j = \overline{1, n}$$

Шаг 7. Формирование результирующего упорядочения вариантов.

Для установления результирующего упорядочения вариантов используются следующие правила:

$a_j P a_l$ (вариант a_j предпочтительнее a_l), если $\Phi(a_j) > \Phi(a_l)$,

$a_j I a_l$ (вариант a_j неразличим с a_l), если $\Phi(a_j) = \Phi(a_l)$.

Собственно это правило является основным для решения задачи многокритериального выбора наиболее предпочтительного варианта разделения состава частей проекта между отечественными предприятиями и предприятиями инозаказчика.

Однако, в ряде случаев для более детального обоснования и интерпретации полученных результатов и дополнительных аналитических исследований предлагается разновидность метода многокритериального потокового ранжирования. В этой разновидности метода в исследовательских целях может быть получено частичное упорядочение вариантов с использованием положи-

тельных и отрицательных потоков по следующему правилу:

$$a_j Pa_l, \text{ если } \begin{cases} \Phi^+(a_j) \geq \Phi^+(a_l) \text{ и } \Phi^-(a_j) < \Phi^-(a_l), \\ \Phi^+(a_j) > \Phi^+(a_l) \text{ и } \Phi^-(a_j) = \Phi^-(a_l), \end{cases}$$

$$a_j Ia_l, \text{ если } \Phi^+(a_j) = \Phi^+(a_l) \text{ и } \Phi^-(a_j) = \Phi^-(a_l),$$

$$a_j Ra_l, \text{ в ином случае,}$$

где P , I и R – отношения предпочтения, неразличимости и несравнимости соответственно.

С целью демонстрации алгоритма метода многокритериального потокового ранжирования рассмотрим пример решения задачи многокритериального выбора наиболее предпочтительного варианта разделения состава частей проекта между отечественными предприятиями и предприятиями инозаказчика.

Пусть имеется пять вариантов разделения состава частей проекта по созданию перспективного беспилотного летательного аппарата между отечественными и иностранными предприятиями (далее – варианты).

Для оценки приоритетности оцениваемых вариантов и выбора наилучшего из них учитывается шесть критериев:

- 1) доля минимально потребных суммарных средств инозаказчика;
- 2) обеспеченность отечественным НТЗ;
- 3) уровень надежности и ремонтпригодности;
- 4) обеспеченность отечественными материалами и КИ;
- 5) доля отечественной ИС;
- 6) сроки создания изделия.

Оценка вариантов по качественным критериям осуществлялась с использованием вербально-числовой шкалы Харрингтона, представленной в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Вербально-числовая шкала Харрингтона

№ п/п	Содержательное описание градаций для показателей, по которым необходимо обеспечить более высокие оценки	Числовое значение	Содержательное описание градаций для показателей, по которым необходимо обеспечить более низкие оценки
1	Очень высокая	1,0 – 0,8	Очень низкая
2	Высокая	0,8 – 0,63	Низкая
3	Средняя	0,63 – 0,37	Средняя
4	Низкая	0,37 – 0,2	Высокая
5	Очень низкая	0,2 – 0,0	Очень высокая

В целом исходные данные для рассматриваемой задачи оценки приоритетности вариантов приведены в таблице 2.

В таблице 3 представлены параметры метода многокритериального потокового ранжирования, задаваемые лицом, принимающим решения (ЛПР).

Таблица 2 – Исходные данные для задачи оценки приоритетности вариантов

№ п/п	Вариант	Оценки вариантов по критериям					
		доля суммарных средств инозаказчика, % $w_1 = 0,2$	обеспеченность отечественным НТЗ $w_2 = 0,1$	уровень надежности и ремонтпригодности $w_3 = 0,2$	обеспеченность отечественными материалами и КИ $w_4 = 0,1$	доля отечественной ИС $w_5 = 0,15$	сроки создания образца, лет $w_6 = 0,25$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$M(S(1))$ «100%/0%»	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
2	$M(S(2))$ «75%/25%»	0,25	0,65	0,90	0,60	0,70	7
3	$M(S(3))$ «50%/50%»	0,50	0,40	0,75	0,55	0,50	5
4	$M(S(4))$ «25%/75%»	0,75	0,20	0,70	0,30	0,30	8
5	$M(S(5))$ «0%/100%»	1,00	0,00	0,60	0,00	0,00	12

Таблица 3 – Параметры метода многокритериального потокового ранжирования

Параметры МПРТ	Критерии оценки вариантов					
	доля суммарных средств инозаказчика	обеспеченность отечественным НТЗ	уровень надежности и ремонтпригодности	обеспеченность отечественными материалами и КИ	доля отечественной ИС	сроки создания образца
Желаемое направление изменения оценок	Увеличение	Уменьшение	Увеличение	Увеличение	Увеличение	Уменьшение
Вид функции предпочтения	 Функция с областью линейного предпочтения	 Функция с областью линейного предпочтения	 Функция Гаусса	 Функция с областью линейного предпочтения	 Функция с областью линейного предпочтения	 Функция с областью линейного предпочтения
Порог явного предпочтения	0,25	0,2	-	0,2	0,2	2
Порог функции Гаусса	-	-	0,2	-	-	-

Результаты решения задачи оценки приоритетности вариантов приведены в таблице 4 и на рисунках 10 и 11.

Из результатов расчета видно, что наиболее предпочтительным является вариант с равным долевым участием отечественных и иностранных предприятий. Варианты самостоятельного создания изделия обеими сторонами являются наименее предпочтительными.

Таким образом, разработан методический подход к определению рационального состава участников проектов по созданию наукоемких изделий с долевым участием иностранных заказчиков.

В качестве метода решения задачи выбора наиболее предпочтительного варианта разделения состава частей проекта предлагается метод многокритериального потокового

ранжирования, позволяющий на основе типового набора критериев получить количественные оценки приоритетности оцениваемых вариантов.

Предлагаемый подход обеспечивает учет высокого уровня неопределенности исходных данных задачи, предоставляя возможность выделения нескольких концептуально значимых вариантов долевого участия предприятий инозаказчика при разработке наукоемкой продукции.

Разработанный методический подход позволяет определять оптимальный состав участников и распределения работ по созданию изделий в зависимости от использования ими финансовых, научных, трудовых и производственных ресурсов, а также учитывать специфику создания сложных современных технических систем.



Таблица 4 – Результаты решения задачи оценки приоритетности вариантов

№ варианта	$\Phi+$	$\Phi-$	Φ	Приоритет
$M(S(1))$	0.4225	0.4875	-0.0650	4
$M(S(2))$	0.4844	0.3559	0.1286	2
$M(S(3))$	0.5388	0.3144	0.2244	1
$M(S(4))$	0.4184	0.4112	0.0071	3
$M(S(5))$	0.3000	0.5951	-0.2951	5

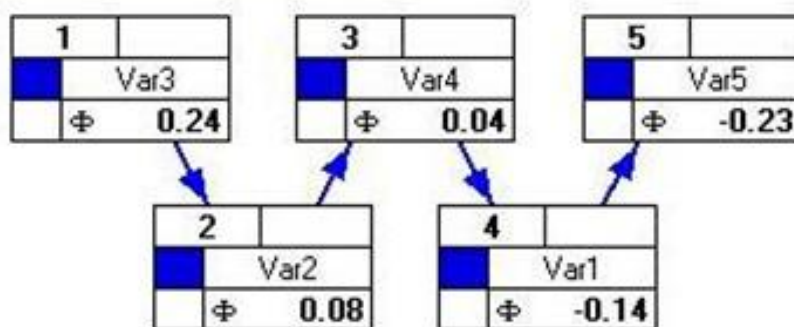


Рисунок 10 – Полное упорядочивание вариантов с использованием методов многокритериального потокового ранжирования

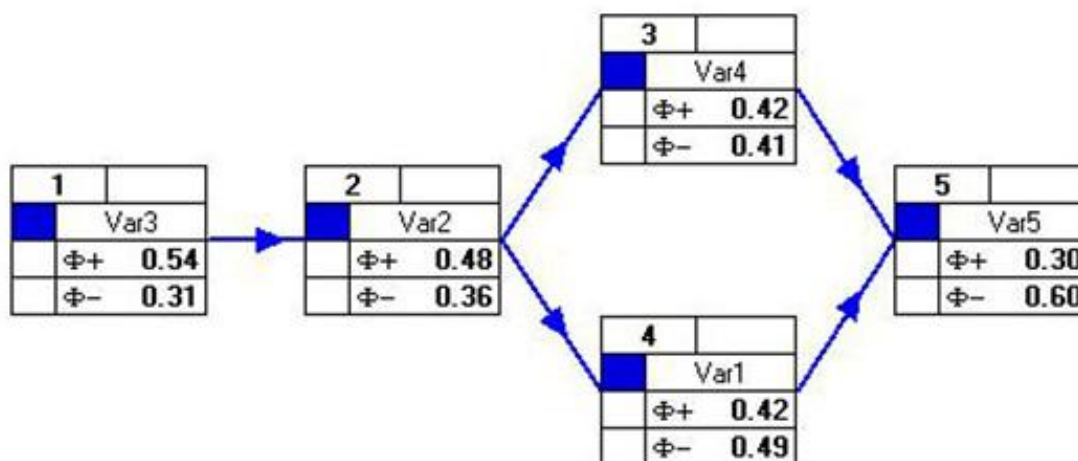


Рисунок 11 – Частичное упорядочивание вариантов с использованием методов многокритериального потокового ранжирования

Список использованных источников

1. Московский А.М. Военно-техническая политика государства: современный этап и тенденции развития. – М.: «Военный парад», 2006 г.

2. Ивлев А.А., Корчак В.Ю., Стукало Ю.Е., Макуха В.С. Влияние ФППИ на развитие вооружение // Сборник рефератов депонированных рукописей – М.: ЦВНИ МО РФ. – Серия Б. Выпуск №76, 2007.

3. Миллер Дж. А. Магическое число семь плюс или минус два. О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию // Инженерная психология. – М.: Прогресс, 1964.

4. Brans J., Vinke P. H. and Mareschal B. How to select and how to rank projects: The Promethee method.

European Journal of Operational Research. 1986. V.24, pp. 228-238.

5. Литвак Б.Г. Разработка управленческого решения: Учебник. – 3-е изд., испр. – М.: Дело, 2002. – 392 с.

6. Лавринов Г.А. Военно-экономическое обеспечение реализации планов развития вооружения и военной техники. Монография. – М.: Центр военно-научной информации МО РФ, 2002.

7. Бельянинов А.Ю. Военно-техническое сотрудничество и интеграционные процессы в оборонно-промышленном комплексе России / Под. ред. д.э.н. В.В.Бандурина. – М.: ИНИОН РАН, 2003. – 256 с.