

УДК 519.168, 65.011

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МЕЖЗАВОДСКОЙ КООПЕРАЦИИ

А.С. СИЛАНТЬЕВ,
С.Н. МАРЧЕНКОВ

АО «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.И. БЕРГА»

Освоение и выпуск современных образцов военной техники (ВТ) характеризуются сложностью технологических и производственных процессов, а также разветвленной системой кооперации. Ошибка выбора изготовителя составных частей негативным образом скажется на изготовлении образца ВТ в целом. Руководствуясь математическими методами теории исследования операций предложено формирование оптимального состава межзаводской кооперации исходя из минимизации функции риска изготовления образца ВТ с учетом заданных сроков и финансовых ограничений. В ходе исследований рассмотрено несколько вариантов реализации, выбран оптимальный по соответствующим критериям, отражены результаты в части решения оптимизационных задач. Предлагаемый подход позволяет получить оптимальный состав межзаводской кооперации, снизить риск срыва сроков изготовления продукции военного назначения.

Ключевые слова: образец военной техники, кооперация, оптимальный вариант, исследование операций.

APPLICATION OF MATHEMATICAL PROGRAMMING METHODS FOR THE OPTIMAL STRUCTURE OF INTERPLANT COOPERATION

A.A. SILANTIEV, S.N. MARCHENKOV

JSC «CENTRAL RESEARCH RADIOTECHNICAL
INSTITUTE NAMED AFTER ACADEMICIAN
A.I. BERG»

The development and production of modern models of military equipment is characterized by the complexity of technological and production processes, as well as an extensive system of cooperation. An error in choosing the manufacturer of the components will have a negative impact on the production of the equipment as a whole. We propose the optimal composition of the interplant cooperation based on mathematical methods of operations research. The proposed approach makes it possible to obtain the optimal composition of interplant cooperation, to reduce the risk of failure in the production of military products.

KEY WORDS: military equipment, cooperation, operations research.

DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-2-127-132

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение своевременного и качественного выполнения заданий государственного оборонного заказа является ключевой задачей, стоящей перед предприятиями оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России в контексте изменения облика армии и флота.

Отличительными особенностями ОПК являются:

1. Сложность разработки продукции военного назначения (ПВН), при которой её участники являются элементами распределенной сети научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР).

2. Сложность технологических и производственных процессов изготовления, со сложной системой кооперации, как следствие – длительным циклом разработки и изготовления продукции, часто несерийной или малосерийной.

3. Жесткое администрирование и государственное регулирование цен на продукцию, что в свою очередь влияет на особенности ценообразования внутри производственной цепочки.

4. Фактическое отсутствие конкурентного рынка разработки, изготовления, сервисного обслуживания и утилизации продукции военного назначения.

Указанные особенности влияют на сроки и качество работы головного исполнителя (исполнителя). Таким образом, требования государственного заказчика к жестким срокам поставки образцов (изделий) военной техники (ВТ) входят в противоречие с длительным сроком выстраивания кооперационной цепочки. Головной изготовитель (ГИ) серийных изделий-предприятие, отвечающее за изготовление изделия по утвержденной конструкторской документации (КД) и технологической документации (ТД), предназначенной для серийного производства и несет

ответственность за качество изделий в целом, изготовленных на этом предприятии и поставляемых заказчику, а также координирует работу изготовителей составных частей, используемых при изготовлении изделия, и (или) изготовителей дублеров этого же изделия (ГОСТ РВ 15.301-2003). Изготовитель серийных изделий-предприятие, осуществляющее выпуск продукции и ее поставку в установленном порядке. Для единого толкования будем называть его соисполнителем.

Основными причинами, создающими предпосылки к срыву исполнения заданий государственного оборонного заказа, являются: нарушение сроков исполнения контрактных обязательств, несоответствие качества продукции заданным требованиям, исполнение контрактов с превышением заранее определенных ресурсных ограничений.

Указанные причины обусловлены множеством факторов, отметим некоторые из них:

- отсутствие механизмов проектного управления;
- отсутствие системы управления рисками;
- неверная оценка реального потенциала соисполнителя, т.е. привлечение к выполнению обязательств по государственному оборонному заказу (ГОЗ) исполнителей, не обладающих необходимыми компетенциями (производственными мощностями, квалифицированным персоналом и др.),
- отсутствие контроля, должного взаимодействия и координации в рамках межзаводской кооперации.

Авторы выделяют ещё одну проблему, стоящую особняком, но значительным образом влияющую на выполнение отдельных заказов ГОЗ. А именно – заключение государственных контрактов на поставку серийных образцов ВТ при незавершенных опытно-конструкторских работах (СЧ ОКР). Как правило, это обусловлено требованиями государственного заказчика, связанными с высокой потребностью в изделиях ВТ. Возникновению этой ситуации способствует фактор длительного срока выполнения НИОКР, особенно завершающих этапов изготовления опытного образца, проведение государственных (межведомственных) испытаний, корректировка и утверждение РКД. Т.е. организация промышленного (серийного) производства, в том числе подготовка и освоение производства образцов изделий ВТ осуществляется до утверждения РКД литеры «О₁».

Освоение и выпуск современных образцов ВТ чрезвычайно сложный технологический и производственный процесс. Учитывая жесткие ресурсные и временные ограничения возникает задача не просто совершенствования организации разработки и изготовления продукции, а эффективного управления этим процессом [1]. Для целей эффективного управления необходимо оперативно обрабатывать разнородную информацию о ходе работ и формировать на ее основе комплекс управленческих решений. С ростом

функциональной сложности применение традиционных методов организации производства, контроля и оценки хода изготовления продукции становится недостаточным. Возникает необходимость принимать не только организационно и технически обоснованные решения, но и учитывать возможность их реализации и последствия. Если раньше управление конструкторской и производственной деятельностью осуществлялось преимущественно в «ручном» режиме, то в настоящее время с развитием технологий появилась возможность создавать и сопровождать интегрированные информационные модели изделий и сложных технических систем [2].

Для совершенствования системы управления деятельностью ОПК необходимо внедрять современные организационно-экономические механизмы, обеспечивающие эффективное функционирование и развитие системы межзаводской кооперации в области разработки и производства изделий ВТ, в том числе, путем внедрения цифровых технологий, реализацию проектов и мероприятий цифровой трансформации (ЦТ), которые, в том числе, позволят осуществлять объективный критический и всесторонний отбор предприятий, входящих в кооперационную цепочку головного исполнителя, обеспечить регулярный мониторинг и оценку эффективности осуществления контроля, принимать своевременные меры по предотвращению срыва контрактных обязательств.

Учитывая, что срыв сроков поставки составных частей изделия ВТ соисполнителем негативно скажется на реализации всего проекта, задача выбора предприятий кооперации на основе оценки технического, технологического, финансового и производственного потенциала представляется крайне актуальной. С целью увеличения эффективности процесса постановки на производство и изготовления головным исполнителем современных образцов ВТ авторы предлагают разработать математическую модель, позволяющую оптимизировать один из существенных этапов – выстраивание межзаводской кооперации ГИ. Такая модель должна учитывать имеющиеся ограничения и многовариантность решений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, КРИТЕРИИ, ОГРАНИЧЕНИЯ

Оптимизация межзаводской кооперации ГИ сводится к задаче поиска выбора i -ого соисполнителя, привлекаемого к изготовлению j -ого компонента (блока, модуля, узла) образца ВТ, при ограничении на стоимость и сроки при выполнении требований, заданных техническими условиями (ТУ) с максимальным качеством исполнения заказа. Таким образом, необходимо выбрать оптимальный состав соисполнителей (с наилучшим производственно-технологическим и финансовым потенциалом), т.е. минимизировать риск изготовления ПВН с заданными характеристиками

за счет выбора контрагента, обладающего наилучшим потенциалом. Оптимальным будем являться то решение, которое по заранее определенным признакам будет являться предпочтительнее перед другими.

Оценку уровня организации труда, наличия соответствующих материально-технических, технических, технологических и финансовых ресурсов представляется целесообразным осуществлять через интегральный показатель качества предприятия K (рейтинг, универсальный количественный показатель), позволяющий выстраивать анализируемые предприятия в определенном порядке в соответствии с заранее установленными правилами и критериями. При этом экспертная оценка или оценка на основе имеющейся статистики является элементом оценки рисков.

Такую оценку можно осуществлять в ходе внешних аудитов системы менеджмента качества (СМК) на предмет соответствия ГОСТ РВ 0015-002-2012, рассчитывать экспертным методом для каждого предприятия-соисполнителя и ранжировать по видам деятельности. Такая оценка будет отражать возможности предприятия по производству требуемого количества изделий надлежащего качества и определенной номенклатуры по совокупности факторов по следующим исходным данным:

- наличие соответствующих лицензий, сертификатов;
- стабильность производства продукции (уровень производственной, технической и технологической готовности);
- удовлетворенность потребителей качеством продукции;
- статистические оценки результативности СМК;
- финансовая устойчивость.

Использование программных средств позволяет автоматизировать получение коэффициентов по результатам экспертных оценок, причем необходимые для этого алгоритмы могут быть настроены на соответствующую методику расчетов.

Указанная методика позволяет проводить комплексную оценку управления качеством и надежностью оборонной продукции на основе обобщенного показателя, характеризующего состояние процессов предприятия.

Ключевыми (показателями верхнего уровня) являются:

- удовлетворенность потребителей качеством продукции;
- степень выполнения требований к продукции;
- степень выполнения требований ГОСТ РВ 0015-002-2012;
- степень выполнения показателей результативности процессов;
- результативность внутренних и внешних проверок;
- степень достижения в области качества.

Интегральный показатель определяется как свертка частных показателей верхнего уровня, которая может быть аддитивной или мультипликативной.

Постановка задачи: нахождение минимума целевой функции риска изготовления образца ВТ поставщиком ($\Pi [\Pi-01 \dots \Pi-0n]$) при выполнении всех заданных в ТУ характеристик, с учетом стоимостных и временных ограничений.

Сформулируем задачу как нахождение минимума целевой функции риска $R: \min(R(C, T, K))$, со следующими ограничениями:

- C – стоимость проекта (финансовые затраты) $C \leq C_{max}$;
- T – время выполнения работы $[t_{min}, t_{max}]$.

При этом K – интегральный показатель качества как требования соответствия отдельных компонент (и всей системы в целом) заданным параметрам (ТУ).

Реализуемость всей работы оценивается через оценку всех компонентов на основе критерия риска. Примем допущение – риск создания изделия в целом как сумму рисков создания ее отдельных компонентов (система аддитивна).

Решение такого рода задач возможно различными способами:

1. Методом полного перебора, т.е. поиск решения исчерпыванием всех возможных вариантов. Такой способ представляется нецелесообразным, если пространство решений велико, то поиск решений может потребовать экспоненциального времени на проведение расчетов.

2. Решение математическими методами теории исследования операций. В данном случае математический аппарат достаточно хорошо разработан, обширен, включает в себя различные методы, в том числе линейное и динамическое программирование [3, 6].

3. Методом эволюционного алгоритма.

Работа эволюционного алгоритма отчасти повторяет принципы работы биологической эволюции:

- генерирует пул исходных решений разной степени вероятности;
- каждое решение имеет некий уровень пригодности к выживанию;
- решения размножаются перекрестным переносом, то есть их компоненты выбираются из двух или трех существующих решений и затем комбинируются;
- существующие решения мутируют в новые;
- имеет место локальный поиск, в процессе которого генерируются новые решения вблизи лучшего на данный момент решения в популяции;
- происходит отбор, случайно выбранные – неуспешные кандидаты в решения, выбрасываются из генетического пула.

Вместе с тем указанный метод имеет недостатки, а именно – значительное время работы и отсутствие гарантии того, что будет найдено оптимальное реше-

ние. Указанный метод целесообразно применять к нелинейным моделям.

Авторы полагают, что решение оптимизационных задач, поиск оптимальной структуры кооперации (также как решение экономических задач, задач управления и планирования производства) целесообразно решать методом линейного программирования [4]. Задача линейного программирования (ЛП) состоит в нахождении максимума (или минимума) линейной функции при линейных ограничениях.

Общая форма задачи имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{найти} \quad & \text{Max}(K(\sum_{i=1}^n \binom{n}{i} C^i T^i)) \\ & \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} C^i \leq C_{\max} \\ & \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} T^i \leq T_{\max} \end{aligned}$$

где $C^i = (C^1, C^2 \dots C^n)$, $T^i = (T^1, T^2 \dots T^n)$

Как в канонической, так и в стандартной форме все переменные в любом допустимом решении задачи должны принимать неотрицательные значения (такие переменные принято называть неотрицательными в отличие от так называемых свободных переменных, на область значений которых подобное ограничение не накладывается).

Задача ЛП в стандартной форме:

$$w = K(\sum_{i=1}^n \binom{n}{i} C^i T^i) \rightarrow \text{Max}$$

Решение задачи ЛП в стандартной форме возможно симплекс-методом. Указанный метод позволяет переходить от одного допустимого базисного решения к другому, таким образом, что значения целевой функции непрерывно возрастают. В результате оптимальное решение находят за конечное число шагов.

Алгоритмы симплекс-метода позволяют также установить, является ли задача ЛП разрешимой.

Запишем ограничения задачи ЛП в таком виде:

$$c_1 t_1 + c_2 t_2 + \dots + c_n t_n + c_{n+1} t_{n+1} + \dots + c_{n+m} t_{n+m} = c_0 \quad (1)$$

Это определяет базисное решение:

$$t_1, t_2, \dots, t_m$$

Предположим, что это решение допустимо, то есть $t_1 \geq 0, t_2 \geq 0, \dots, t_m \geq 0$. Базис $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ образует m -мерное пространство, а потому каждый из векторов $\{c_{n+1}, c_{n+2}, \dots, c_{n+m}\}$ единственным образом выражается через этот базис.

Если C_r не входит в базис, то

$$c_1 t_{1r} + c_2 t_{2r} + \dots + c_{n+r} t_{n+r} = c_r \quad (2)$$

где t_{ir} – соответствующие коэффициенты ($i=1,2,\dots,m$).

Предположим, что хотя бы одна из величин t_{ir} – больше нуля.

Решение уравнения:

$$c_1 t_1 + c_2 t_2 + \dots + c_m t_m + c_r t_r = c_0 \quad (3)$$

Умножив уравнение (2) на t_r и вычтя полученное уравнение из уравнения (1), получим:

$$c_1(t_1 - t_r \times t_{1r}) + c_2(t_2 - t_r \times t_{2r}) + \dots + c_m(t_m - t_r \times t_{mr}) = c_0 - t_r c_r \quad (4)$$

Сравнив уравнения (4) и (3) находим связь нового решения со старым базисным решением: t_1, t_2, \dots, t_m

$$\tilde{t}_1 = (t_1 - t_r), \tilde{t}_2 = (t_2 - t_{2r}), \dots, \tilde{t}_m = (t_m - t_{mr}) \quad (5)$$

Решение (5), во-первых, не будет базисным, так как содержит $m+1$ переменную, а во-вторых, будет допустимым не для всех значений t_r .

Чтобы новое решение оставалось допустимым, нужно выбрать значение t_r таким, чтобы ни одна из величин $\tilde{t}_i = (t_i - t_{ir})$ ($i=1,2,\dots,m$) не стала меньше нуля. Следовательно, максимальное значение переменной t_r определяется соотношением:

$$t_{r,\max} = \min_i \begin{pmatrix} t_i \\ t_{ir} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где $t_r \geq 0$.

Чтобы сделать новое допустимое решение базисным, нужно одну переменную t_i вывести из базисного решения, а соответствующий вектор из базиса. В этом случае новый базис будет содержать также m векторов.

Для этого выбираем значения в соответствии с (6). Тогда новое базисное решение имеет вид:

$$\begin{aligned} t_1 - t_{r,\max} t_{1r} \\ t_2 - t_{r,\max} t_{2r}, \\ t_{r,\max} \end{aligned}$$

а новый базис – $\{C_1, C_2, \dots, C_m, C_r\}$.

Такой переход от одного базиса к другому позволяет находить решения почти всех задач ЛП. Определив все крайние точки, можно вычислить значения целевой функции и найти оптимальное решение. Однако для больших значений m и n это практически невозможно. Поэтому для перехода от текущего решения к новому допустимому базисному решению, которому отвечает большее значение целевой функции, используют соответствующий критерий (симплекс-разность). Симплекс-разность вычисляют для каждой переменной, не входящей в базисное решение, и выбирают такую небазисную переменную t_r , для которой симплекс-разность положительна и максимальна.

Таким образом, алгоритм симплекс-метода состоит из следующих этапов:

- нахождение начального базиса и связанного с ним допустимого базисного решения;
- вычисление симплекс-разности для каждой переменной, не входящей в базисное решение;
- ввод в базис наиболее приемлемой переменной с максимальной положительной симплекс-разностью;
- нахождение ее значения $t_{r \max}$ и определение из соотношения

$$t_{r \max} = \min_i \begin{pmatrix} t_i \\ t_{ir} \end{pmatrix} \quad (7)$$

для всех $t_{ir} > 0$

- вывод из базисного решения переменной t_{ir} соответствующей

$$\min_i \begin{pmatrix} t_i \\ t_{ir} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_j \\ t_{jr} \end{pmatrix}$$

а из базиса – вектор $t_{r \max}$.

Этапы необходимо повторить до тех пор, пока симплекс-разности для всех переменных, не входящих в базис, не станут отрицательными. Это и есть признак оптимальности текущего базисного решения.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ, РАСЧЕТЫ, ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

В качестве примера рассмотрим следующую задачу: для изготовления образца ВТ силами соисполнителей необходимо изготовить три модуля, один из которых (второй) необходимо изготовить в количестве двух единиц. При этом: $C_{max} \leq 700, t_{max} \leq 41$. Рассматриваемые варианты представлены в таблице 1.

Отметим, что в приведенной модели авторами проведено сужение множества альтернатив, с целью ухода от большого количества данных.

Таким образом, общая математическая постановка задачи:

1. необходимо изготовить три модуля, один из которых (второй) необходимо изготовить в количестве двух единиц;

2. качество исполнения K_{max} поставки не ниже 27;

3. при выполнении следующих ограничений:

- время поставки (t_{max}) не более 41 дня;
- общая стоимость поставки C_{max} не превышает 700 тыс. руб.

Как было сказано выше, такого рода задачи целесообразно решать методами ЛП. Указанный метод хорошо реализуется с использованием стандартного функционала офисного программного обеспечения MS Office или же созданием отдельного интегрируемого модуля в информационной оболочке предприятия

Настройка в MS Excel [5] позволяет создавать крупномасштабные модели оптимизации в произвольной форме внутри электронной таблицы. Перед началом для проведения расчетов оптимизации необходимо подготовить таблицу с исходными данными для математической модели.

Стандартный функционал MS Excel предоставляет пользователю такой функционал с помощью надстройки «Поиск решения» со следующими математическими методами решения:

- (1) Симплекс-метод.
- (2) Метод общего понижающего градиента (ОПГ).
- (3) Эволюционный поиск решения.

По причинам, указанным выше, авторы полагают целесообразным выбрать симплекс-метод. Проведя расчеты с помощью надстройки «Поиск решения» получен результат, представленный в табл. 2.

Решение задачи является допустимым, поскольку результаты выбора полностью соответствуют ограничениям. Результаты сопоставления приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 1.

Варианты изготовления модулей

Модуль	Кол-во	Поставщик	Качество (К)	Цена (С), руб.	Срок (Т), дн.	Стоимость, руб.
Модуль 1	1	П-01	7	150 000	21	150 000
Модуль 2	2	П-01	9	200 000	20	400 000
Модуль 3	1	П-01	8	170 000	10	170 000
Модуль 1	1	П-02	7	145 000	22	145 000
Модуль 2	2	П-02	7	190 000	15	380 000
Модуль 3	1	П-02	8	160 000	8	160 000
Модуль 1	1	П-03	7	130 000	15	130 000
Модуль 2	2	П-03	6	200 000	14	400 000
Модуль 3	1	П-03	6	120 000	10	120 000

ТАБЛИЦА 2.

Результаты расчетов

Наименование	П-01	П-02	П-03	Итого
Модуль 1	0	0	1	1
Модуль 2	0	2	0	2
Модуль 3	0	0	1	1

Произведенные расчеты позволяют произвести обоснованный выбор состава кооперации.

ВЫВОДЫ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Повышение уровня сложности изделий ВТ ставит перед предприятиями-изготовителями вопрос о совершенствовании механизмов, обеспечивающих эффективное функционирование и развитие системы межзаводской кооперации. Сложившаяся практика выбора предприятий-соисполнителей на «понятийном уровне» не обеспечивает эффективное управление процессом. На практике управленческие решения могут приниматься с опозданием, без использования количественных и качественных оценок. Сжатые сроки освоения производства и выпуска новой продукции при ограниченном финансировании и резком ужесточении требований к качеству со стороны госзаказчика приводят к необходимости применения новых методов и подходов. Вместе с тем имеющийся аппарат математического программирования позволяет повысить продуктивность экономической и производственной деятельности, принимать эффективные решения и оперативно реагировать на отклонения.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности успешного решения задачи оптимального выбора состава кооперации (с учетом финансовых и временных ограничений), путем применения встроенных средств программного продукта MS Excel.

Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты примененных математических методов позволяют сформировать комплекс обоснованных управленческих решений о структуре межзаводской кооперации, предложенные модели представляют собой законченные формализованные механизмы принятия решений.

Дальнейшее развитие исследования предполагает поиск решений по интеграции такого блока в автоматизированную систему управления предприятием (ERP).

ТАБЛИЦА 3.

Сопоставление результатов расчетов с ограничениями

Показатель	Предельные значения	Результат расчёта
C_{\max}	700 000	630 000
k	27	27
T_{\max}	41	40

ЛИТЕРАТУРА

- АНДРЕЕВ Г.И., СОЗИНОВ П.А., ТИХОМИРОВ В.А. Управленческие решения при проектировании радиотехнических систем. М. 2018. 560 с.
- БОЕВ С.Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 430 с.
- ВЕНТЦЕЛЬ Е.С. Исследование операций. М.: Сов. Радио, 1972. 203с.
- ДАНЦИГ Д. Линейное программирование, его применение и обобщение. М.: Прогресс, 1966.
- ДОЛЖЕНКОВ В. А., КОЛЕСНИКОВ Ю.В. Microsoft Excel 2000 в подлиннике, БХВ-Петербург, 2000.
- ТАХА ХЭМДИ А. Исследование операций, 10-е изд. [пер. с англ.]. СПб.: Диалектика, 2019. 1056 с.

Силантьев Александр Александрович,
начальник договорного управления АО «Центральный
научно-исследовательский радиотехнический институт
имени академика А.И. Берга»

☎ тел.: +7(916) 100-63-50, e-mail: dogovor@cnirti.ru

Марченков Сергей Никифорович,
начальник отдела автоматизированных систем АО «Цен-
тральный научно-исследовательский радиотехнический ин-
ститут имени академика А.И. Берга»

☎ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9,
20, bld. 9, Novaya Basmannaya st., Moscow, 108078,
тел.: +7(915) 010-33-14, e-mail: marchenkov@cnirti.ru