

# МЕТОД ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ (ВЫБОРА) ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО РАСЧЕТА ПО СТОИМОСТНОМУ И НАДЕЖНОСТНОМУ КРИТЕРИЯМ

Скворцов Михаил Сергеевич

ОАО "Специализированная инжиниринговая компания СЕВЗАПМОНТАЖАВТОМАТИКА"  
[Mikhail\\_Skvortsov@szma.com](mailto:Mikhail_Skvortsov@szma.com)

## Аннотация

Рассматриваются подходы и методы к решению задачи технико-экономического обоснования (выбора) проектируемых структурно-сложных технических систем по критерию "надежность-стоимость", пути их реализации в программном комплексе автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ СЗМА). Приводятся примеры решения задач выбора проектных решений автоматизированной системы управления и противоаварийной защиты по критерию надежности реализации системных функций при ограничении на стоимость (по критерию стоимости системы при ограничениях на надежность реализации системных функций).

## 1. Постановка задачи технико-экономического обоснования

Задача технико-экономического обоснования (ТЭО) выбора варианта проектного решения структурно-сложной технической системы (ССТС) с учетом стоимости и надежности варианта является задачей многокритериального выбора. Для решения такой задачи, прежде всего, необходимо найти полный набор проектных решений (вариантов) из которого следует осуществить выбор. Стремление лица принимающего решение (ЛПР) достичь определенной цели в математических терминах выражается в виде максимизации (или минимизации) некоторой числовой функции, заданной на множестве возможных решений. В случаях, когда исследуемая система рассматривается с различных точек зрения (надежность, стоимость и др.), приходится иметь дело с несколькими функциями, так как для формализации каждой точки зрения используется соответствующая функция. Таким образом, возможно, используя данные функции (оценки решения), однозначно оценить последствия того или иного выбора по всем исследуемым критериям [1]. Следовательно, имеет место задача принятия решения в условиях определенности.

Выбор оценочного критерия надежности при проведении ТЭО должен осуществляться в соответствии с основным функциональным назначением ССТС. Например, при проектировании автоматизированной системы пожаротушения резервуарных парков нефти наиболее важным является обеспечение высокого коэффициента готовности и малого времени восстановления системы, так как вероятность одновременного отказа системы и возникновения пожара очень мала. Однако для АСУТП технологических установок с непрерывным процессом наиболее важным является другой показатель надежности – средняя наработка на отказ. Поэтому выбор оценочного критерия надежности зависит от конкретного вида задачи ТЭО [2].

Одна из задач заключается в нахождении такого оптимального варианта построения ССТС, чтобы максимизировать надежность системы и удовлетворить ограничение по стоимости (или минимизировать стоимость и удовлетворить ограничения по надежности). Другая задача заключается в выборе оптимального варианта построения системы по векторному критерию «надежность-стоимость».

В этих задачах  $X$  представляет множество конкурирующих проектов, а оценочными критериями, образующими векторный критерий оптимальности служат стоимость реализации проекта  $F_1$  и вероятность безотказной работы  $F_2$ .

Исходя из технологических и функциональных требований к ССТС, осуществляется построение обобщенной структурной схемы ССТС, в виде схемы функциональной целостности (СФЦ) с выделением отдельных подсистем. На СФЦ каждая из подсистем образующих ССТС представлена в виде эквивалентированных функциональных вершин в нескольких возможных вариантах их реализа-

ции. Для этого при помощи метода обратной декомпозиции [3] исследуемая структурно-сложная техническая система, разбивается на технические подсистемы.

Обозначим  $A = A_1 \times \dots \times A_n$ , где  $A$  – множество вариантов структурно-сложной технической системы,  $n$  – количество технических подсистем, из которых состоит ССТС,  $A_i = \{a_1, \dots, a_l\}$ , – множество вариантов реализации технической подсистемы в составе ССТС,  $l = \overline{1, k}$  – количество вариантов реализации технической подсистемы  $i$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Тогда, вариант построения ССТС  $a = (a_1, \dots, a_n)$ ,  $a \in A$ ,  $A = A_1 \times \dots \times A_n$ ,  $a_i \in A_i$

На СФЦ ССТС задаются критерии успешного функционирования  $F_j$ , которые представляют собой события реализации функций ССТС (контроля, регулирования, противоаварийной защиты) заданных в техническом задании на проектирование. Каждая из функций  $F_j$  реализуется при помощи некоторого множества подсистем  $A_j = A_1 \times \dots \times A_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  (при этом количество подсистем  $i \leq n$ ), объединенных логическими взаимосвязями на СФЦ в соответствующий критерий  $F_j$ . Тогда, каждая из функций  $j$  системы  $F_j$ , имеет количество вариантов технической реализации равное

мощности множества  $|A_j| = \prod_{i=1}^n k_i$ , ( $k_i$  – количество вариантов каждой подсистемы участвующей в реализации функции  $j$ ). Варианты представляют собой набор кратчайших путей успешного функционирования  $Kpf_j$  для соответствующего критерия  $F_j$  заданного на СФЦ [2]. Любая из подсистем  $A_n$  может участвовать в реализации нескольких функций системы  $F_j$ . Например, датчик уровня (функция представления информации об уровне на автоматизированном рабочем месте оператора, функция автоматического регулирования уровня) или контроллер противоаварийной защиты (ПАЗ) (участвует в реализации всех функций противоаварийной защиты в системе). Таким образом, множества  $\{A_n\}$  и  $\{F_j\}$  находятся в отношении “многие ко многим”.

Для каждого варианта технической реализации подсистемы  $a_i$  определены стоимостные  $c_i = C(a_i)$  и надежностные  $p_i = P(a_i)$  характеристики. Вариант технической реализации подсистемы  $a_i$ , в общем случае, представляет собой СФЦ, в качестве вершин которой выступают отдельные технические средства (датчики, блоки питания, модули, барьеры и т.п.). Таким образом, техническая подсистема может отображаться на СФЦ в виде эквивалентированной функциональной вершины. Эквивалентированные вершины обладают теми же свойствами обычных функциональных вершин СФЦ, однако их собственные вероятностные параметры не задаются на этапе постановки задачи, а должны определяться на основе автономного моделирования и расчета характеристик соответствующих декомпозированных подсистем, которые они представляют.

Стоимостной характеристикой подсистемы  $a_i$  является сумма стоимостей всех технических средств, входящих в данный вариант (ниже приведена возможная формула расчета):

$C(t) = C_0 + k \cdot C_0 \cdot t$ , где  $C_0$  – начальные затраты на приобретение;

$k \cdot C_0 \cdot t$  – стоимость обслуживания (владения) к моменту времени  $t$ ;

$C(a_i) = \sum_{i=1}^l c_i$ , где  $l$  – количество технических средств, образующих  $i$  – *ый* вариант технической реализации подсистемы  $A_i$ .

Надежностным показателем является вероятность безотказной работы системы в течение заданного временного интервала  $P$  или коэффициент готовности  $K_T$ .

## 2. ТЭО проектного решения ССТС на основе многовариантного расчета по стоимостному критерию

Для каждой функции  $F_j$  в соответствии с техническим заданием, ГОСТом или техническим заданием на проектирование, определяется количественный показатель надежности  $P_{0j}$ , который не-

обходимо обеспечить. От ЛПР, требуется выбрать вариант технической реализации ССТС, удовлетворяющий этим требованиям, при минимально возможной стоимости системы. Таким образом, рассматриваемая задача имеет следующее формальное описание:

$$\begin{aligned} \min C(a), \\ P_j(a) \geq P_{0j}, \quad j = \overline{1, J}, \end{aligned}$$

где  $C(a)$  – стоимость ССТС,  $J$  – количество функций ССТС,  
 $a = (a_1, \dots, a_n)$ ,  $a \in A$ ,  $A = A_1 \times \dots \times A_n$ ,  $a_i \in A_i$   
 $A_i = \{a_{i1}, \dots, a_{ik}\}$ ,  $l = \overline{1, k}$  – количество вариантов реализации технической подсистемы  $i$ ,  
 $i = \overline{1, n}$ ;  
 $P_j(a)$  – вероятность безотказной работы  $j$ -ой функции ССТС.

### 3. ТЭО проектного решения ССТС на основе многовариантного расчета по надежности критерию

Заказчиком системы задается ограничение на суммарную стоимость ССТС  $C = \sum_{i=1}^n c_i$ ,  $n$  – количество подсистем. Требуется выбрать вариант технической реализации ССТС такой, чтобы надежность показатели функций  $P_j(a)$  были максимально возможными (или сумма отклонений показателей от максимумов была минимальна) при заданном ограничении. Таким образом, рассматриваемая задача имеет следующее формальное описание:

$$\begin{aligned} \max P_j(a), \quad j = \overline{1, J}, \\ C(a) \leq C_0, \end{aligned}$$

где  $C(a)$  – стоимость ССТС,  $J$  – количество функций ССТС,  
 $a = (a_1, \dots, a_n)$ ,  $a \in A$ ,  $A = A_1 \times \dots \times A_n$ ,  $a_i \in A_i$   
 $A_i = \{a_{i1}, \dots, a_{ik}\}$ ,  $l = \overline{1, k}$  – количество вариантов реализации технической подсистемы  $i$ ,  
 $i = \overline{1, n}$ ;  $P_j(a)$  – вероятность безотказной работы  $j$ -ой функции ССТС.

Основные положения разработанного метода ТЭО при решении двух вышеуказанных задач рассмотрим на примере простейшей системы управления и противоаварийной защиты насоса. Предположим что, разрабатываемая СУ и ПАЗ состоит из 6 технических подсистем: подсистемы измерения температуры, подсистемы ввода и первичной обработки сигнала от датчика температуры, подсистемы связи модулей ввода-вывода с контроллером, подсистемы контроллера, подсистемы автоматизированного рабочего места (АРМ), подсистемы модуля дискретного вывода. Система реализует две функции: передачу и отображение информации (о температуре подшипников) на станцию оператора (функция контроля) и автоматическое отключение насоса при превышении температурой обмоток предаварийного значения (функция защиты). Первая задача заключается в необходимости осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что вероятность реализации функции 1 системой в течение 4380 часов должна быть не менее 0,8; функции 2 – не менее 0,9 при минимально возможной стоимости. Вторая задача заключается в необходимости осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что стоимость реализации системы не более 13500, при максимально возможных вероятностях реализации системой своих функций в течении 4380 часов.

#### Этап 1. Построение структурной схемы

На первом этапе выполняется построение структурной схемы ССТС. На данном этапе, исходя из технологических и функциональных требований к СУ и ПАЗ, осуществляется построение обобщенной структурной схемы комплекса технических средств СУ и ПАЗ, с выделением отдельных подсистем. В рассматриваемом примере полагаем, что обобщенная функциональная схема системы управления (СУ) насосом имеет следующий вид.

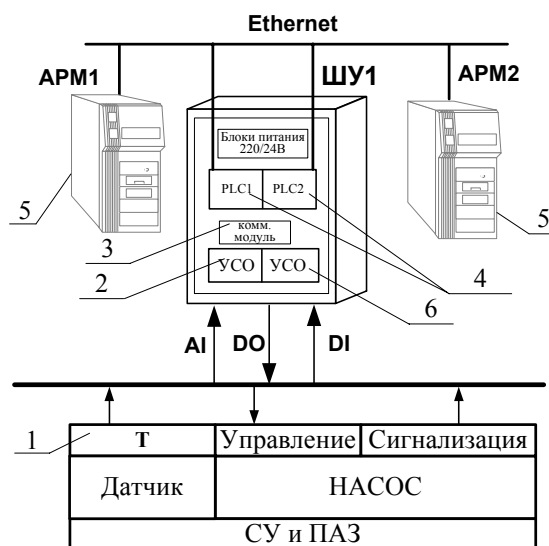


Рис.2. Функциональная схема системы управления насосом

На схеме выделены следующие подсистемы:

- 1 подсистема измерения температуры;
- 2 подсистема ввода и первичной обработки сигнала от датчика температуры;
- 3 подсистема связи модуля ввода-вывода с контроллером (коммуникационный процессор);
- 4 подсистема контроллера;
- 5 подсистема АРМ;
- 6 подсистема модулей дискретного вывода.

#### Этап 2. Определение вариантов реализаций подсистем

На этом этапе производится определение вариантов реализации подсистем ССТС, исходя из ресурсных возможностей проекта. Из базы данных комплектующих проекта, для каждой подсистемы разрабатываемой ССТС выбираются (с учетом технического назначения) допустимые к применению различные элементы и оборудование КИПиА.

Таблица 1. Исходные данные вариантов реализации технических подсистем

1	2	3	4	5	6
1.1 C = 50 To = 5,7	2.1 C = 200 To = 48	3.1 C = 700 To = 20	4.1 C = 1500 To = 12	5.1 C = 1500 To = 3	6.1 C = 180 To = 54
1.2 C = 120 To = 7	2.2 C = 250 To = 40	3.2 C = 600 To = 24	4.2 C = 3800 To = 16	5.2 C = 3000 To = 4,5	6.2 C = 170 To = 50
1.3 C = 100 To = 8,55	2.3 C = 400 To = 72	3.3 C = 1400 To = 30	4.3 C = 9000 To = 28		6.3 C = 360 To = 81
1.4 C = 240 To = 10,5	2.4 C = 500 To = 60	3.4 C = 1200 To = 36	4.4 C = 12000 To = 40		6.4 C = 340 To = 75

#### Этап 3. Разработка структурной модели вариантов построения проектируемой системы

На этом этапе осуществляется разработка структурной модели вариантов построения проектируемой системы с помощью аппарата *схем функциональной целостности* (СФЦ) общего логико-вероятностного метода и программных комплексов автоматизированного моделирования систем [4, 5].

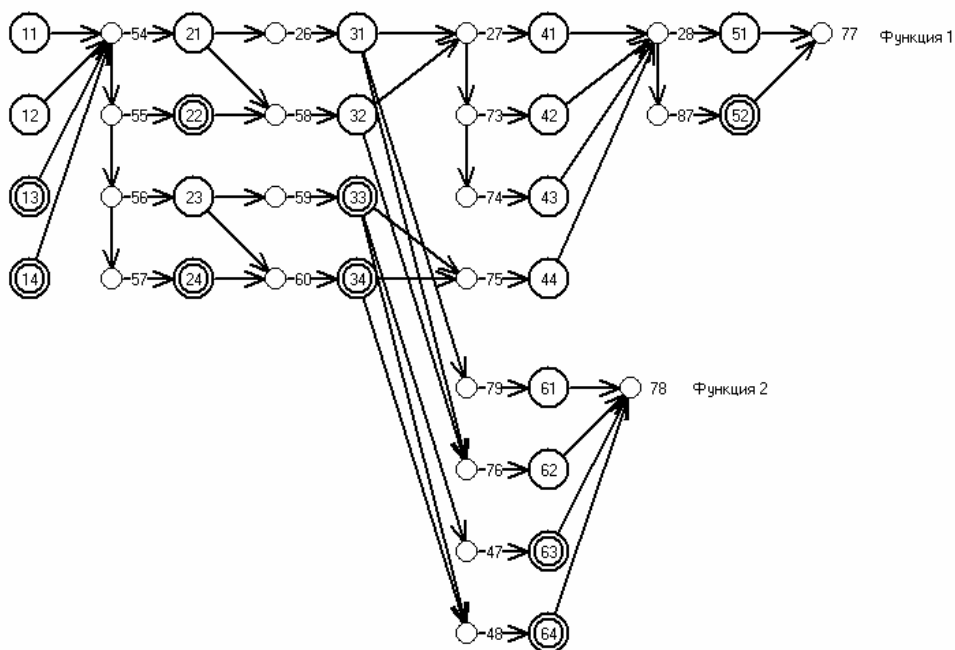


Рис.4 Альтернативная СФЦ вариантов построения СУ и ПАЗ насосом

При построении СФЦ в качестве заходящих в вершину  $i$  указываются дуги тех элементов, которые по техническим условиям способны обеспечить работу данного элемента  $i$  системы. Условие реализации системой ее функциональных назначений определяется *логическими критериями функционирования* (ЛКФ). Критерием функционирования СУ и ПАЗ насоса является реализация выходных функций  $y_{77}$  и  $y_{78}$ .

#### Этап 4. Построение подсистем ССТС и расчет их характеристик

На этом этапе осуществляется построение СФЦ подсистем АСУТП на основе механизма структурной декомпозиции [3], реализованного в ПК АСМ СЗМА [5]. Этот механизм позволяет с помощью эквивалентированных вершин представлять структуры соответствующих подсистем. При создании СФЦ подсистем можно использовать все возможности основного аппарата алгебры логики в функционально полном базисе операций “И”, “ИЛИ”, “НЕ”. На данном этапе предлагаемый метод ТЭО предусматривает расчет показателей надежности и стоимости для каждой эквивалентированной вершины, содержащей в себе СФЦ варианта построения подсистемы ССТС.

#### Этап 5. Нахождение вариантов построения системы

Любой путь функционирования функции ССТС, определяемый ее СФЦ (см. например рис.4) представляет собой один из вариантов технической реализации функции ССТС. Используя ПК АСМ СЗМА, найдем эти пути функционирования СУ и ПАЗ насоса для каждой системной функции. Для каждой функции такой путь представляет собой отдельную конъюнкцию дизъюнктивной нормальной формы логической функции работоспособности. Для критерия  $y_{77}$ , по СФЦ на рис.4, с помощью ПК АСМ СЗМА определены 96 возможных вариантов технической реализации системной функции контроля (в каждый вариант входит 5 подсистем), для критерия  $y_{78}$  определены 32 возможных варианта системной функции защиты (в каждый вариант входит 4 подсистемы). Сформулированные выше правила позволяют рассчитать показатели надежности (вероятность безотказной работы) и стоимость реализации каждого варианта каждой системной функции. На основе этих данных строятся монотонно возрастающие дискретные зависимости вероятности безотказной работы функции от стоимости ее реализации. При этом варианты реализации функций, которые не удовлетворяют условию монотонного возрастания стоимости, исключаются из дальнейшего анализа. Таким образом мы получим множество вариантов технической реализации до множества Парето для критерия надежность-стоимость [6]. В табл.2 и 3 приведены результаты автоматизированного моделирования и расчетов для обеих функций.

Таблица 2. Результаты расчетов вероятности безотказной работы и стоимости для функции контроля СУ и ПАЗ насосом

№ вар	Номера вершин (подсистем)	Стоимость	Вероятность безотказной работы
5	1.1 2.1 3.2 4.1 5.1	3850	0,720865
7	1.3 2.1 3.2 4.1 5.1	3900	0,742254
8	1.4 2.1 3.2 4.1 5.1	4040	0,750359
12	1.4 2.2 3.2 4.1 5.1	4240	0,752969
53	1.1 2.1 3.2 4.1 5.2	5350	0,762047
55	1.3 2.1 3.2 4.1 5.2	5400	0,784658
56	1.4 2.1 3.2 4.1 5.2	5540	0,793226
60	1.4 2.2 3.2 4.1 5.2	5740	0,795985
68	1.4 2.1 3.2 4.2 5.2	7840	0,801532
72	1.4 2.2 3.2 4.2 5.2	8040	0,80432
80	1.4 2.1 3.2 4.3 5.2	13040	0,812339
84	1.4 2.2 3.2 4.3 5.2	13240	0,815164
92	1.4 2.3 3.4 4.4 5.2	16690	0,820682
96	1.4 2.4 3.4 4.4 5.2	16940	0,824109

Таблица 3. Результаты расчетов вероятности безотказной работы и стоимости для функции защиты СУ и ПАЗ насосом

№ вар	Номера вершин (подсистем)	Стоимость	Вероятность безотказной работы
5	1.1 2.1 3.2 6.2	1020	0,879001
7	1.3 2.1 3.2 6.2	1070	0,905082
8	1.4 2.1 3.2 6.2	1210	0,914965
12	1.4 2.2 3.2 6.2	1410	0,918147
24	1.4 2.3 3.4 6.4	2030	0,922493
28	1.4 2.4 3.4 6.4	2280	0,926345

*Этап 6. Задача 1. Минимизация стоимости системы при заданной надежности функционирования*

Напомним, что необходимо осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что вероятность реализации функции 1 системой в течение 4380 часов должна быть не менее 0,8; функции 2 – не менее 0,9 при минимально возможной стоимости.

Видно, что для функции 1 вариант 68 удовлетворяет требованию к надежности и обладает при этом минимальной стоимостью. Для функции 2 таким вариантом будет вариант 7. Эти варианты несовместны, так как в реализации первой функции для первой подсистемы выбирается вариант 1.4, а для функции 2 для первой подсистемы выбирается вариант 1.3. Для обеспечения совместности и удовлетворения требований к надежности реализации системных функций, для функции 2 выбираем вариант реализации 8. Тогда, система обладающая требуемыми свойствами будет иметь следующий состав: 1.4 2.1 3.2 4.2 5.2 6.2. Стоимость реализации – 8010.

*Этап 7. Задача 2. Максимизация показателей надежности системы при заданной стоимости*

Напомним, что необходимо осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что стоимость реализации системы не более 13500, при максимально возможных вероятностях реализации системой своих функций в течении 4380 часов.

Видно, что выбрав для функции 1 вариант 84, а для функции 2 вариант 12 мы получим совместную систему, имеющую состав: 1.4 2.2 3.2 4.3 5.2 6.2. Стоимость системы составляет 13410, а так как выбор вариантов производился из множеств Парето, это гарантирует отсутствие более высоконадежных и менее дорогих вариантов построения системы.

Список литературы

1. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматлит, 2002.
2. Скворцов М.С. Метод технико-экономического обоснования проектных решений АСУТП с учетом надежности и стоимости // Труды третьей международной научной школы “Моделирование и

анализ безопасности и риска в сложных системах ”. МА БР – 2003. СПб.: Издательство “Бизнес-Пресса”, 2002, с. 337-344.

3. Нозик А.А. Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб, 2005, с. 49-96.

4. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988 – 68с.

5. Можяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной Научной Школа “Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах” (МА БРК–2001). СПб.: Издательство ООО “НПО “Омега”, 2001, с.56-61.

6. Ногин В.Д. Логическое обоснование принципа Эджворта-Парето // Журн. вычисл. мат. и мат. физики, 2002, №7, с. 951-957.