ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 001.891.57

JEL O2

DOI: 10.17213/2312-6469-2021-2-277-288

ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТОИМОСТНОГО И НАДЕЖНОСТНОГО КРИТЕРИЕВ

© Д.О. Таишыков, В.А. Сычев 2021

**ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И.Платова», г. Новочеркасск, Россия**

В работе рассматриваются методы выбора проектных решений по созданию структурно-сложных технических систем (ССТС) на основе надежности и стоимостного критериев применительно к такой продукции как магистральные и промышленные электровозы. Предлагается формализованный подход к многокритериальному выбору того или иного варианта проектного решения по созданию ССТС с учетом ее стоимости и надежности, а также с использованием методов структурного синтеза ССТС.

Ключевые слова: структурно-сложные технические системы, проектное решение, надежность, стоимость, структурный синтез.

SELECTION OF DESIGN SOLUTIONS FOR STRUCTURALLY COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS BASED ON COST AND RELIABILITY CRITERIA

© D.O. Tashlykov, V.A. Sychev 2021

**South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov,
Novocherkassk, Russia**

The paper considers the methods of selecting design solutions for the creation of structurally complex technical systems (STS) based on reliability and cost criteria in relation to such products as mainline and industrial electric locomotives. A formalized approach to the multi-criteria choice of a particular variant of the design solution for the creation of STS is proposed, taking into account its cost and reliability, as well as using methods of structural synthesis of STS.

Keywords: *structurally complex technical systems, design solution, reliability, cost, structural synthesis.*

В настоящее время с проблемой повышения качества и надежности выпускаемой продукции, а соответственно ее конкурентоспособности сталкивается любая компания в рыночной экономике. Предприятия транспортного машиностроения и, в частности, крупнейший российский производитель магистральных и промышленных электровозов – ООО «ПК «НЭВЗ», также проводят большую работу по обеспечению надежности выпускаемой продукции, которая отличается высокой сложностью и состоит из множества деталей и агрегатов, число которых может превышать 250 тысяч наименований. При этом данная продукция помимо высокой надежности должна также удовлетворять условиям ценовой конкурентности, что обуславливает сложность задач организации производства магистральных и промышленных электровозов, а соответственно и необходимость задач разработки методического обеспечения по организации выпуска структурно сложных технических систем, к которым относятся магистральные и промышленные электровозы. Всё это определяет актуальность настоящей работы, посвящённой развитию методов выбора проектных решений по созданию структурно-сложных технических систем на основе надёжностного и стоимостного критериев.

Очевидно, что задача выбора того или иного варианта проектного решения по созданию структурно-сложной технической системы (ССТС) с учетом ее стоимости и надежности является задачей многокритериального выбора. Для решения такой задачи, как правило, необходимо осуществить полный перебор возможных проектных решений (вариантов), на основании которого осуществляется выбор способа изготовления продукции.

При этом отметим, что процедура оптимизации проектных решений в математических терминах обычно 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, можно, используя данные функции (оценки решения), однозначно оценить последствия того или иного выбора по всем исследуемым критериям [1].

Рассмотрим вышеуказанную проблему подробнее. Как правило, при решении задачи создания ССТС, удовлетворяющей различным требованиям, производитель сталкивается с множеством конкурирующих вариантов. При этом будем считать, что оценочными критериями, образующими векторный критерий оптимальности, служат стоимость изготовления продукции (реализации проекта) F_1 и вероятность ее безотказной работы F_2 . При этом автор считает, что главная задача производителя заключается

в нахождении такого оптимального варианта структурно-сложной технической системы, который бы максимизировал надежность системы и удовлетворял ограничениям по стоимости.

Для решения данной задачи, исходя из технологических и функциональных требований к ССТС, как правило, на предварительном этапе осуществляется построение обобщенной структурной схемы ССТС, в виде схемы функциональной целостности (СФЦ) с выделением отдельных подсистем ССТС. На СФЦ каждая из подсистем, образующих ССТС представляется в виде эквивалентированных функциональных вершин в нескольких возможных вариантах их реализации [2].

Обозначим $A = A_1 \times \dots \times A_n$, где A – множество вариантов структурно-сложной системы, n – количество технических подсистем, из которых состоит ССТС, $A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}$ – множество вариантов реализации технической подсистемы в составе ССТС, $l = 1, \dots, k$ – количество вариантов реализации технической подсистемы i , $i = 1, \dots, n$. Тогда вариант построения ССТС определяется как $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $a \in A$, $A = A_1 \times \dots \times A_n$, $a_i \in A_i$.

Для каждого варианта технической реализации подсистемы a_i должны быть определены стоимостные $c_i = C(a_i)$ и надежностные $p_i = P(a_i)$ характеристики. При этом вариант технической реализации подсистемы a_i , в общем случае, представляет собой СФЦ, в качестве вершин которой выступают отдельные технические средства (узлы, модули, датчики, блоки питания, 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.

Заказчиком системы задается ограничение на суммарную стоимость ССТС

$$C = \sum_{i=1}^n c_i,$$

где n – количество подсистем.

Требуется выбрать такой вариант технической реализации ССТС, чтобы надежностные показатели $P(a)$ выбранного варианта реализации ССТС $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ были максимально возможными при заданном ограничении на суммарную стоимость ССТС. Таким образом, рассматриваемая задача имеет следующее формальное описание:

$$\begin{aligned} P(a_j = (a_1, a_2, \dots, a_n)) &\rightarrow \max, \\ C(a_j = (a_1, a_2, \dots, a_n)) &\leq C_0, \end{aligned}$$

где $C(a_j = (a_1, a_2, \dots, a_n))$ – стоимость j -го варианта реализации ССТС; $P(a_j = (a_1, a_2, \dots, a_n))$ – надежность показатели (вероятность безотказной работы) j -го варианта реализации ССТС.

Далее в рамках вышеприведенной формальной постановки перейдем к рассмотрению последовательности шагов выбора варианта технической реализации ССТС на примере изготовления в ООО «ПК «НЭВЗ» асинхронного тягового двигателя ДТА-1200А (далее – ТЭД).

ТЭД предназначен для преобразования электрической энергии, получаемой из контактной сети через преобразователь, в механическую энергию, передаваемую колесной паре через передаточный механизм.

Первая составляющая задачи выбора варианта технической реализации ТЭД заключается в необходимости осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что вероятность реализации функции системой (ТЭД) в течение 430 107 часов должна быть не менее 0,8. Вторая задача заключается в необходимости осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что стоимость реализации системы не более 1 500 000 руб., при максимально возможных вероятностях реализации системой своих функций в течении 430 107 часов.

Далее, на первом шаге рассматриваемой задачи выполним построение структурной схемы ТЭД для оценки его надежности. В рассматриваемом примере полагаем, что данная структурная схема для надежности ТЭД имеет следующий вид (рис. 1).

На втором шаге проведем определение вариантов реализации подсистем рассматриваемой ССТС (ТЭД), исходя из ресурсных возможностей проекта. Для этого из базы данных комплектующих проекта, для каждой подсистемы, разрабатываемой схемы структурно-сложной технической системы выбираются (с учетом технического назначения) допустимые к применению различные элементы.

Рис. 1. Структурная схема для оценки надежности асинхронного тягового двигателя ТА- 1200А

Таблица 1

Исходные данные вариантов реализации технических подсистем

Комплекту- ющие	1	2	3	4	...	24
Собственное производство	1.1. С = = 100 000 50 000	2.1. С = = 35 000 150 000	3.1. С = = 2 000 90 000	4.1. С = = 55 000 110 000	...	24.1. С = = 20 00 600 000
Отечествен- ный произво- дитель	1.2. С = = 150000 80 000	2.2. С = = 39 000 130 000	3.2. С = = 1 500 90 000	4.2. С = = 75 000 120 000	...	24.2. С = = 22 000 600 000
Импортное производство	1.3. С = = 300 000 170 000	2.3. С = = 55 000 160 000	3.3. С = = 4 000 90 000	4.3. С = = 100 000 240 000	...	24.3. С = = 35 000 600 000

На следующем этапе осуществляется построение схемы функциональной целостности подсистем ТЭД на основе механизма структурной декомпозиции [2], реализованного в программном комплексе (ПК) позволяющем проводить автоматизированный расчет надежности сложных технических систем (например: RELEX (Relxsoftware Corporation, США); A.L.D.Group (Израиль); RiskSpectrum (RelconAB, Швеция); ISOGRAPH (Великобритания), ПК АСОНИКА-К; ПК АСМ (ПК для автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем, ОАО «СПИК СЗМА»). 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 схему функциональной целостности варианта построения подсистемы структурно-сложной технической системы.

Заключительный, пятый этап, заключается в нахождении вариантов построения системы. Сформулированные выше правила позволяют в специализированном ПК 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.

В табл. 2 представлены результаты расчетов вероятности безотказной работы и стоимости для ТЭД.

Таблица 2

Результаты расчетов вероятности безотказной работы и стоимости
для ТЭД

№ варианта	Номера подсистем	Стоимость	Вероятность безотказной работы
5	1.1, 2.2, 3.1, 4.3.... 24.3	1 370 000	0,72
7	1.2, 2.1, 3.3, 4.2.... 24.2	1 392 000	0,74
8	1.3, 2.2, 3.1, 4.1.... 24.1	1 405 000	0,7503
12	1.3, 2.1, 3.1, 4.1.... 24.2	1 412 000	0,7529
23	1.2, 2.2, 3.1, 4.1.... 24.1	1 435 000	0,76
29	1.2, 2.3, 3.2, 4.3.... 24.1	1 442 000	0,77
45	1.3, 2.3, 3.2, 4.2.... 24.2	1 462 000	0,79
57	1.3, 2.3, 3.1, 4.2.... 24.3	1 479 000	0,81
89	1.1, 2.3, 3.3, 4.3.... 24.2	1 496 000	0,82
90	1.1, 2.2, 3.3, 4.2.... 24.3	1 510 000	0,8221
95	1.3, 2.3, 3.2, 4.2.... 24.3	1 542 000	0,8243

Напомним, что необходимо осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что вероятность реализации функции ТЭД в течение 430 107 часов должна быть не менее 0,8. Видно, что для функции вариант 57 удовлетворяет требованию к надежности и обладает при этом минимальной стоимостью.

С целью решения поставленной задачи № 2 необходимо осуществить выбор проектного решения исходя из требования, что стоимость реализации системы не более 1 500 000 руб., при максимально возможных вероятностях реализации системой своих функций в течении 430 107 часов. Тогда выбрав для функции вариант 89, мы получим систему, имеющую состав: 1.1 2.3 3.3 4.3...24.2. Стоимость системы составляет 1 496 000, а так как выбор вариантов производился из множеств Парето, то это гарантирует отсутствие более высоконадежных и менее дорогих вариантов построения системы.

Далее отметим, что для повышения эффективности проектных решений в конструировании сложных технических систем и организации процессов их производства с требуемыми показателями надежности в процесс проектирования сложных технических систем, как правило, включают процедуру синтеза структуры проектируемой системы, отражающей более детализированное представление рассматриваемой ССТС и многовариантность реализации элементов данного представления.

В ходе структурного синтеза осуществляется автоматическая генерация различных структур проектируемой системы и выбор такой ее конфигурации, которая реализует заданную целевую функцию и удовлетворяет совокупности предъявляемых условий и внешних ограничений.

Рассмотрим суть процедуры структурного синтеза проектируемой технической системы [3]. Предварительно отметим, что любую ССТС можно представить в виде последовательности связанных между собой структурных составляющих, операции по изготовлению которых будем обозначать q^j_i . Каждая операция (технологическая фаза) может включать в себя другие операции. Взаимосвязь операций по изготовлению структурных составляющих можно задать ориентированным гиперграфом [4]. Пример такого гиперграфа показан на рис. 2.

Схему, показанную на рис. 2 можно также называть технологическим графом TG . При этом дугам гиперграфа придается следующий смысл. Пусть q^j_i - некоторая фаза, а $q^{j+1}_m, \dots, q^{j+1}_k$ - фазы, связанные с фазой q^j_i дугами, ориентированными от q^j_i . Тогда фаза q^j_i является выполненной, если выполнены все фазы $q^{j+1}_m, \dots, q^{j+1}_k$. Причем порядок выполнения этих фаз не существен. Начало выполнения фазы q^j_i определяется моментом начала выполнения одной или нескольких первоначально выполняемых фаз $q^{j+1}_m, \dots, q^{j+1}_k$, а конец – моментом окончания выполнения последней из фаз $q^{j+1}_m, \dots, q^{j+1}_k$.

Рис. 2. Пример гиперграфового представления ССТС

Наличие дуг между фазами $q^{j+1}_m, \dots, q^{j+1}_k$ задает порядок их выполнения. При этом дуга, связывающая любую пару фаз q^{j+1}_i, q^{j+1}_m и ориентированная от q^{j+1}_i к q^{j+1}_m , означает, что выполнение фазы q^{j+1}_m не может быть начато до завершения фазы q^{j+1}_i .

Очевидно, что для задач структурного синтеза гиперграф, показанный на рис.2., может быть расширен, посредством ввода в него отношений, связывающих фазы процесса производства сложного технического объекта с множеством вариантов технических реализаций каждой его технологической фазы q^{j_i} и экономическими, а также надежностными оценками для этих вариантов. Указанное расширение возможно посредством представления каждой вершины q^{j_i} графа на рис.2 по аналогии с иерархическими гиперграфовыми структурами в виде, изображенном на рис. 3.

Рассмотрим теперь суть процедуры структурного синтеза проектируемой технической системы. Обозначим через $\varphi_Z^{(k)}(q^{j_i})$ функцию оценки затрат, связанных с технической реализацией фазы q^{j_i} , где k задает один из возможных вариантов технической реализации q^{j_i} , определяемых проектировщиком, исходя, например, из требований по надежности. Тогда

$$\varphi_Z(q^{j_i}) = \bigcup (\varphi_Z^{(j)}(q^{j_i})) \bigcup_K \bigcup \varphi_Z^{(k)}(q^{j_i})$$

задает общую функцию оценки затрат по фазе q^{j_i} с учетом имеющихся различных вариантов ее технической реализации и соблюдения ограничений по конструктивной сложности

Рис. 3. Пример гиперграфового представления технологической фазы q^{j_i}

$$\Phi_{KC}^*(q_i^j) < \Phi_{KC}^{(k)}(q_i^j), \quad k = 1, K, K.$$

где $\Phi_{KC}^*(q_i^j)$ – заданная минимальная оценка уровня конструктивной сложности технической реализацией фазы q_i^j .

При этом критерий оптимальности структурного синтеза проектируемой технической системы может быть определен в виде

$$\Phi_Z(TG) = \min_{q_i^j \in OTG} \Phi_Z(q_i^j);$$

Данный критерий определяет требование поиска таких вариантов технической реализации фаз технологического графа TG , при которых обеспечивается минимальная величина затрат по созданию проектируемой технической системы с учетом соблюдения ограничений по конструктивной сложности ее отдельных фаз $q_i^j \in OTG$, чтобы не снижать технический уровень реализации проектируемой системы и ее надежность и эксплуатационные характеристики. При этом практическая разработка вышеопределенной процедуры структурного синтеза проектируемой ССТС может быть осуществлена с использованием различных методов, в частности, поисковых методов теории искусственного интеллекта [5].

Литература

1. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматлит, 2002. – 176 с.
2. Нозик А.А. Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб, 2005. – С. 49-96.
3. Сычев В.А. Структурный синтез в задачах проектирования сложных производственных систем в условиях перехода к цифровой экономике // Сб. трудов II-й национальной научно-практической конференции с зарубежным участием «Кластеризация цифровой экономики: глобальные вызовы». Санкт-Петербург, 18 - 20 июня 2020 г. / Под ред. Д.Г. Родионова, А.В. Бабкина. В 2-х томах. Т. 2. Раздел 8. Цифровые технологии в экономике и промышленности. – СПб.: Изд-во «ПОЛИТЕХ-ПРЕСС», 2020. – С. 509-518. Электронный ресурс Том 2: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43094999>
4. Овчинников В.А. Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем / В.А. Овчинников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 424 с.
5. Рассел Стюарт, Норвиг Питер. Искусственный интеллект: современный подход: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1408 с.

*Поступила в редакцию**25.01.2021*

Ташлыков Дмитрий Олегович – магистрант кафедры «Производственный и инновационный менеджмент» Южно-Российского Государственного Политехнического Университета (НПИ) имени М.И.Платова, г. Новочеркасск, Россия.

Tashlykov Dmitry Ol. – Master's student of the Department "Production and Innovation Management" of the South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov, Novocherkassk, Russia.

Сычёв Василий Анатольевич – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры «Производственный и инновационный менеджмент» Южно-Российского Государственного Политехнического Университета (НПИ) имени М.И.Платова, г. Новочеркасск, Россия.

Sychev Vasliy An. – Doctor of economic Sciences, Docent, Professor of the Department "Production and Innovation Management" of the Southern Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov, Novocherkassk, Russia.

Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132
132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, 346428, Russia
e-mail: Dtashlykov10@yandex.ru
e-mail: sitchev@mail.ru