

# МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. А. МУСАЕВ<sup>1</sup>, М. С. СКВОРЦОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, <sup>2</sup>ОАО «СПИК СЗМА»

<sup>1</sup>СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178; <sup>2</sup>ОАО «СПИК СЗМА», пер. Каховского, д. 10, Санкт-Петербург, 199155

<sup>1</sup><Alexander\_Musaev@szma.com>, <sup>2</sup><Mikhail\_Skvortsov@szma.com>

---

УДК 621.382

Мусаев А. А., Скворцов М. С. **Методы параметрической оптимизации надежности структурно-сложных технических систем** // Труды СПИИРАН. Вып. 6. — СПб.: Наука, 2008.

**Аннотация.** Представлены результаты разработки методов оптимизации надежности структурно-сложных технических систем с целью обеспечения оптимального выбора элементов и степени их резервирования по критериям надежности и стоимости. Возникающая задача оптимизации формулируется как задача целочисленного программирования, размерность задачи уменьшается в результате применения метода многомерного деления пополам. Показана работоспособность методов на примере системы управления и противоаварийной защиты насоса. — Библ. 8 назв.

UDC 621.382

Musaev A. A., Skvortsov M. S. **Methods of parametric reliability optimization of structurally complex technical systems** // SPIIRAS Proceedings. Issue 6. — SPb.: Nauka, 2008.

**Abstract.** The paper presents results of development of the reliability optimization methods for structurally-complex technical systems to select an optimum elements structure and their redundancy level within the specified reliability and cost constraints. Optimization problem means integer programming, and the scope of the task is reduced by using the multivariate bisection method. Functionality of the method is shown on the example of the pump control and emergency shutdown system. — Bibl. 8 items.

---

## 1. Постановка задачи

Как правило, технические решения, принимаемые при создании структурно-сложных технических систем (ССТС) с целью увеличения их надежности (выбор более надежных элементов, резервирование элементов и т.п.), приводят к увеличению стоимости проекта. Поэтому разработка методов оптимизации надежности в условиях ограничения материальных ресурсов ССТС является весьма актуальной.

Задачи оптимизации надежности ССТС рассматриваются применительно к АСУТП. АСУТП являются многофункциональными системами, функции которых имеют существенно различную значимость и соответственно характеризуются разным уровнем требований к надежности их выполнения. Согласно ГОСТ 24.701-86 [1], количественное описание, анализ и оценку надежности АСУ проводят по каждой функции АСУ в отдельности. Кроме того, согласно ГОСТ 27.003-90 [2] для изделий, имеющих канальный принцип построения, требования по безотказности и ремонтпригодности допускается задавать в расчете на один канал. Поэтому далее под надежностью АСУТП (или другой структурно-сложной технической системы) будем понимать надежность реализации ее функций в расчете на один канал.

В данной работе под параметрической оптимизацией надежности ССТС понимается обоснование выбора одного из множества возможных вариантов

построения технической системы, являющегося оптимальным по выбранному критерию "надежность-стоимость".

Пусть ССТС состоит из  $N$  подсистем и реализует  $J$  системных функций. Введем обозначения:

$x = (x_1, \dots, x_n)$  – поэлементный вариант ССТС;

$x \in A$ ,  $A = \varphi\{A_1, \dots, A_N\}$ , где  $\varphi$  – структурная функция ССТС, состоящей из  $N$  подсистем,  $A_i$  – подсистема ССТС;

$x_j \in A_j$ ,  $A_j = \{a_1, \dots, a_k\}$ ,  $K$  – количество вариантов технической подсистемы  $A_j$ .

В рамках ТЭО обеспечения надежности могут решаться следующие задачи:

- построение варианта структурно-сложной технической системы с минимальной стоимостью при выполнении заданных требований к надежности реализации ее функций:

$$C(x) \rightarrow \min_{x \in D}, D \subseteq A;$$

$$D = \{x \in A / P_j(x) \geq P_{0j}\}, j = \overline{1, J},$$

где  $D$  – множество допустимых значений  $x$ ;  $C(x)$  – стоимость ССТС;  $P_j(x)$  – вероятность безотказной работы по реализации  $j$ -ой функции ССТС.

- построение варианта структурно-сложной технической системы с максимальной линейной сверткой вероятностей безотказной реализации ее функций при ограничениях по стоимости:

$$\sum_{j=1}^J \beta_j P_j(x) \rightarrow \max_{x \in D}, D \subseteq A;$$

$$D = \{x \in A / C(x) \leq C_0\},$$

где  $\beta_j$  – коэффициенты, учитывающие разную значимость функций ССТС.

Результатом исследования задач указанных классов стала разработка методов технико-экономического обоснования (ТЭО) обеспечения надежности структурно-сложных технических систем на стадии проектирования. Данные методы созданы для внедрения и использования в программном комплексе АРБИТР [3], основанном на технологии автоматизированного структурно-логического моделирования и общем логико-вероятностном методе системного анализа [4]. Область применения методов ограничена классом монотонных систем, для которых допустимым является утверждение о том, что с ростом надежности отдельного элемента, надежность системы в целом не уменьшается. Подавляющее большинство технических систем относится к классу монотонных.

## 2. Метод параметрической оптимизации надежности проектируемой системы по критериям надежности и стоимости

Данный метод рассматривается на примере фрагмента АСУТП – системы управления и противоаварийной защиты (СУ и ПАЗ) насоса.

## Этап 1. Построение структурной схемы

На этом этапе, исходя из технологических и функциональных требований к технической системе, выполняется построение обобщенной структурной схемы комплекса технических средств АСУТП с выделением отдельных подсистем.

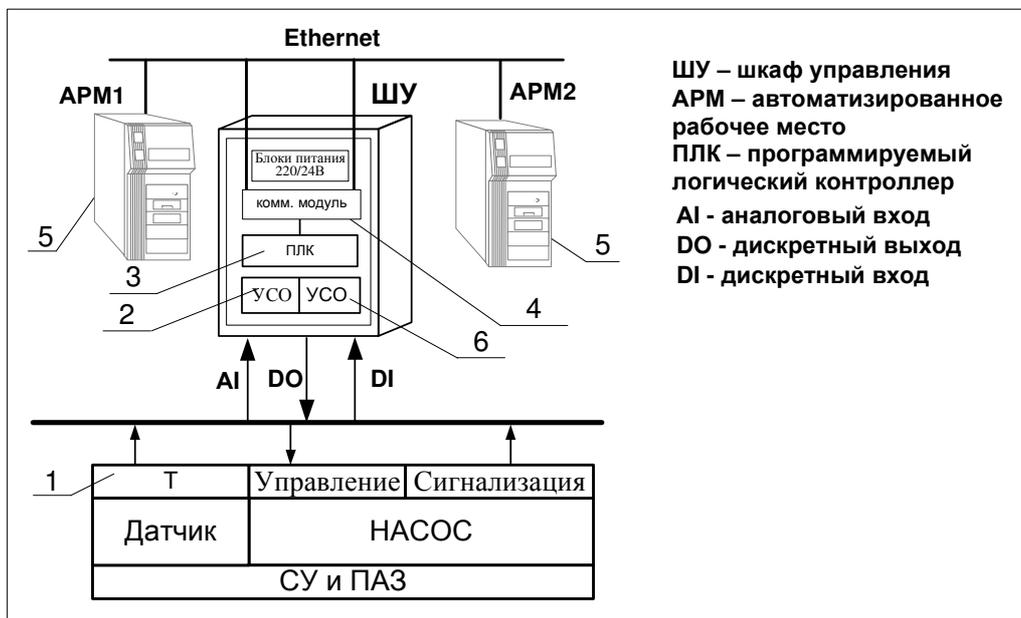


Рис. 2. Функциональная схема системы управления насосом

На практике процесс создания системы предполагает ее декомпозицию на подсистемы (модули), представляющие автономные функциональные единицы [5]. По результатам анализа функциональной схемы, изображенной на рис.2, разрабатываемая СУ и ПАЗ разделяется на шесть технических подсистем: подсистема первичного измерения температуры (1), подсистема ввода и обработки сигнала от датчика температуры (2), подсистема контроллера (3), подсистема связи контроллера с АРМ (коммуникационный процессор) (4), подсистема АРМ (5), подсистема модулей дискретного ввода-вывода (6).

Исследуемая система реализует две функции: функцию передачи и отображения информации (о температуре подшипников) на станцию оператора (функция контроля F1) и функцию автоматического отключения насоса при превышении температурой обмоток верхнего предельно допустимого значения (функция защиты F2).

## Этап 2. Определение вариантов реализаций подсистем

На втором этапе, исходя из ресурсных возможностей проекта, производится определение вариантов реализации выделенных подсистем АСУТП. Для каждого варианта осуществляется построение соответствующей схемы функциональной целостности (СФЦ) [3] с использованием аппарата односвязной структурной декомпозиции [6], реализованного в ПК АРБИТР. Декомпозиция позволяет представлять структуры различных вариантов подсистем с помощью эквивалентированных вершин суперграфа СФЦ. Для каждого варианта технической

реализации  $a_k$  подсистемы  $A$  с помощью ПК АРБИТР определяются стоимостные  $C_k^A$  и надежностные  $P_k^A$  характеристики.

На рис. 3 представлены варианты реализации одной из подсистем рассматриваемого примера АСУТП, в виде эквивалентированных вершин. Рядом с эквивалентированными вершинами показаны их эквивалентные СФЦ.

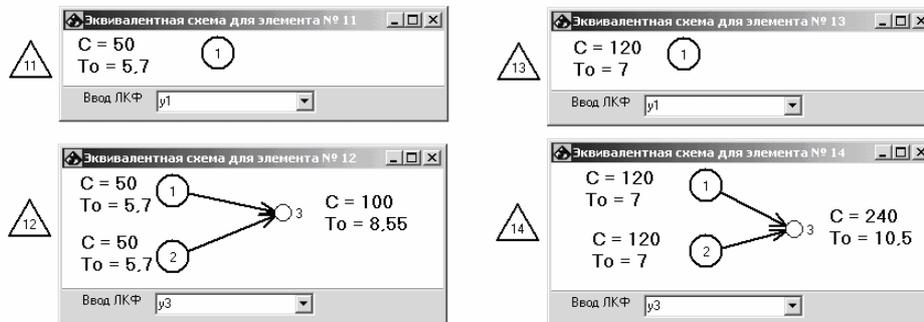


Рис. 3. Варианты реализации подсистемы первичного измерения температуры

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

На этом этапе осуществляется разработка структурной модели вариантов построения проектируемой системы с помощью специальной альтернативной СФЦ системы.

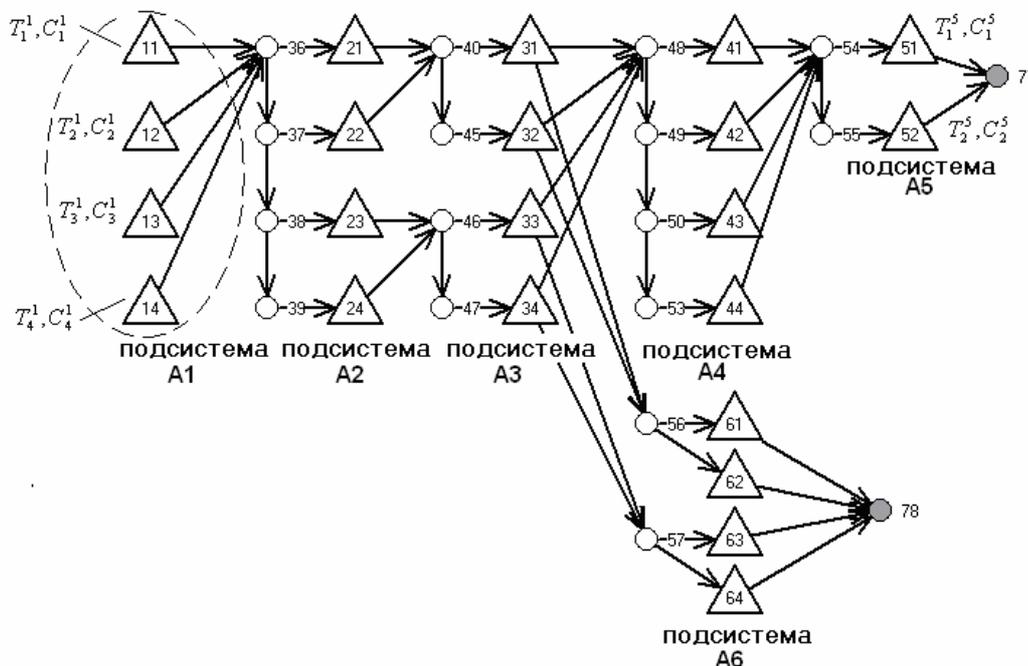


Рис. 4. Альтернативная СФЦ для разрабатываемой СУ и ПА3

На альтернативной СФЦ с помощью фиктивных вершин задаются критерии успешного функционирования  $f_j$ , которые представляют собой события реализации функций АСУТП (контроля, регулирования, противоаварийной за-

щиты), заданных в техническом задании на проектирование. В рассматриваемом примере критерием функционирования СУ и ПАЗ насоса является реализация выходных функций  $y_{77}$  и  $y_{78}$ .

Варианты построения технической системы представляют собой набор кратчайших путей успешного функционирования  $Kpf_j$  для соответствующего критерия  $f_j$ , заданного на СФЦ [7].

Таблица 1

Результаты расчетов различных вариантов реализации технических подсистем

A1	A2	A3	A4	A5	A6
$C_1^1 = 50$ $T_1^1 = 5,7$	$C_1^2 = 200$ $T_1^2 = 48$	$C_1^3 = 1500$ $T_1^3 = 12$	$C_1^4 = 700$ $T_1^4 = 20$	$C_1^5 = 1500$ $T_1^5 = 3$	$C_1^6 = 180$ $T_1^6 = 54$
$C_2^1 = 120$ $T_2^1 = 7$	$C_2^2 = 250$ $T_2^2 = 40$	$C_2^3 = 3800$ $T_2^3 = 16$	$C_2^4 = 600$ $T_2^4 = 24$	$C_2^5 = 3000$ $T_2^5 = 4,5$	$C_2^6 = 170$ $T_2^6 = 50$
$C_3^1 = 100$ $T_3^1 = 8,55$	$C_3^2 = 400$ $T_3^2 = 72$	$C_3^3 = 9000$ $T_3^3 = 28$	$C_3^4 = 1400$ $T_3^4 = 30$		$C_3^6 = 360$ $T_3^6 = 81$
$C_4^1 = 240$ $T_4^1 = 10,5$	$C_4^2 = 500$ $T_4^2 = 60$	$C_4^3 = 12000$ $T_4^3 = 40$	$C_4^4 = 1200$ $T_4^4 = 36$		$C_4^6 = 340$ $T_4^6 = 75$

Где  $T_k^A$  – среднее время наработки на отказ в годах для варианта  $k$  подсистемы  $A$ ;  $C_k^1$  – стоимость варианта  $k$  подсистемы  $A$  в относительных единицах.

#### Этап 4. Формирование целевых задач

**Задача 1.** Задача минимизации стоимости структурно-сложной технической системы при выполнении заданных требований к надежности реализации ее функций.

Осуществляется выбор проектного решения, исходя из требования, что вероятность реализации функции  $F1$  системой в течение 8760 ч должна быть не менее 0,8; функции  $F2$  – не менее 0,9 при минимально возможной стоимости:

$$C(x) \rightarrow \min; D \subseteq A;$$

$$D = \{x \in A / P_{F1}(x) \geq 0.8, P_{F2}(x) \geq 0.9\};$$

$D$  – множество допустимых значений  $x$ .

**Задача 2.** Задача максимизации показателей надежности реализации функций при ограничениях на ее стоимость.

Осуществляется выбор проектного решения, исходя из требования, что стоимость реализации системы должна быть не более 15000 у.е., при макси-

мально возможных вероятностях реализации системой своих функций в течение 8760 ч:

$$\sum_{j=1}^J \beta_j P_j(x) \rightarrow \max_{x \in D}, D \subseteq A; \beta_1 = 0,4 \quad \beta_2 = 0,6;$$

$$D = \{x \in D / C(x) \leq 15000\};$$

$D$  – множество допустимых значений  $x$ ,

где  $\beta_j$  – коэффициенты, учитывающие разную значимость функций АСУТП.

#### Этап 5. Нахождение множества допустимых вариантов

Множество допустимых вариантов могут быть найдены прямым перебором всех возможных вариантов построения СУ и ПАЗ. Данный подход потребовал бы в рассматриваемом примере рассчитать и оценить надежность реализации функций и стоимость для 512 возможных вариантов. Применение метода многомерного половинного деления, предложенного Северцевым в [8] для поиска множества допустимых значений, позволяет значительно уменьшить вычислительную сложность решения. Метод использует априорную информацию о том, что исследуемая техническая система относится к классу монотонных. Дополнительно необходимо провести предварительную сортировку вариантов по возрастанию надежности (стоимости) для каждой из подсистем.

В результате, методом многомерного половинного деления для нахождения множества допустимых значений в задаче 1 (64 варианта) была произведена оценка 12 вариантов построения СУ И ПАЗ, а в задаче 2 (392 варианта) произведена оценка 28 вариантов.

#### Этап 6. Решение задачи оптимизации

*Задача 1.* Для задачи минимизации стоимости системы при наличии требований к надежности реализации функций задача выбора сводится к задаче однокритериальной безусловной оптимизации на множестве допустимых значений. Решением задачи выбора является вариант:

$$x^0 = (13, 23, 33, 42, 52, 64) \quad C^0 = 13440 \quad P_{F1}(x^0) = 0.8188274 \quad P_{F2}(x^0) = 0.9474254 .$$

*Задача 2.* Задача выбора варианта, максимизирующего линейную свертку вероятностей реализации функций системы при наличии ограничений на ее стоимость, является многокритериальной, поэтому вначале определяется множество Парето оптимальных вариантов. На множестве Парето решается задача выбора оптимального варианта, используя линейную свертку вероятностей реализации функций системы:

$$x^0 = (14, 23, 33, 44, 52, 63) \quad C^0 = 14200 \quad P_{F1}(x^0) = 0.8698332 \quad P_{F2}(x^0) = 0.9470943 .$$

### 3. Заключение

Предложенные методы оптимизации надежности могут быть использованы на стадии проектирования ССТС для обеспечения требуемых показателей надежности с минимальными затратами. Разработанные методы могут быть также использованы при анализе уже существующих систем для определения и обоснования оптимальных по стоимости путей повышения их надежности.

В настоящее время выполняется алгоритмизация данных методов с целью последующего их внедрения в ПК АРБИТР.

## Литература

1. ГОСТ 24.701-86. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1986, 17 с.
2. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002, 19 с.
3. АРБИТР, Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0. Автор: *Можаев А. С.* Правообладатель: ОАО "СПИК СЗМА". Свидетельство № 2003611101 от 12 мая 2003 г. об официальной регистрации программ. Роспатент РФ, Москва, 2003. Аттестационный паспорт ПС №222 от 21 февраля 2006 г., Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ.
4. *Можаев А. С.* Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988 – 68 с.
5. *Барлоу Р., Прошан Ф.* Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. /Пер. с англ. – М.:Наука, 1984. – 328 с.
6. *Нозик А. А.* Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб., 2005. С. 49–96 (СПИИРАН, г. Санкт-Петербург).
7. *Скворцов М. С.* Метод технико-экономического обоснования (выбора) проектных решений многофункциональных структурно-сложных технических систем на основе многокритериального расчета по стоимостному и надежности критерию // Труды Международной Научной Школы: "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах" (МА БР - 2006). СПб.: ИПМ РАН, 2006 г. С. 347–353.
8. *Дивеев А. И., Северцев Н. А.* Метод выбора оптимального варианта технической системы. М.:ВЦ РАН, 2003. 106 с.