



МЕТОДЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

К обсуждению предлагаются методы технико-экономического обоснования технических решений, принимаемых при создании и модернизации структурно-сложных технических систем с целью обеспечения оптимального выбора и резервирования их элементов по критериям надежности и стоимости.

Показана работоспособность методов на примере системы управления и противоаварийной защиты насоса.

Михаил Скворцов

Ведущий инженер программист ОАО «СПИК СЗМА»

Как правило, технические решения, принимаемые при создании или модернизации 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 технико-экономического обоснования мероприятий по обеспечению надежности ССТС является весьма актуальной.

Задачи технико-экономического обоснования (ТЭО) надежности ССТС рассматриваются применительно к АСУТП. АСУТП являются многофункциональными системами, функции которых имеют существенно различную значимость и, соответственно, ха-

рактеризуются 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 каналный 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 технико-экономическим обоснованием обеспечения надежности ССТС понимается обоснование выбора одного из множества возможных вариантов построения технической системы, являющегося оптимальным по выбранному критерию «надежность-стоимость».

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

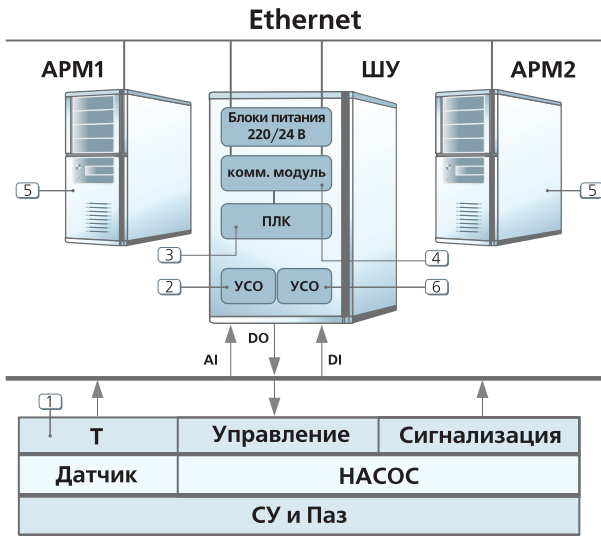
$$\delta = (\delta_1, \dots, \delta_n) - \text{поэлементный вариант ССТС,}$$

$$\delta \in A, A = \varphi \{A_1, \dots, A_N\},$$

где φ – структурная функция ССТС, состоящей из N подсистем, A_i – подсистема ССТС,

$$\delta_i \in A_i, A_i = \{a_1, \dots, a_k\},$$

Методы технико-экономического обоснования обеспечения надежности структурно-сложных технических систем



ШУ - шкаф управления
 АРМ - автоматизированное рабочее место
 ПЛК - программируемый логический контроллер
 AI - аналоговый вход
 DO - дискретный выход
 DI - дискретный вход

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

β_j – коэффициенты учитывающие

разную значимость функций ССТС
 ■ задача оптимального распределения ресурсов при замене элементов на более надежные и дублировании элементов с целью максимального увеличения надежности реализации функций системы (задача модернизации).

Результатом исследования задач указанных классов стала разработка методов технико-экономического обоснования (ТЭО) обеспечения надежности структурно-сложных технических систем на стадии проектирования. Данные

Рис. 1. Функциональная схема системы управления насосом

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.

МЕТОД ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ “СТОИМОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ”

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

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:

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

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

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:

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

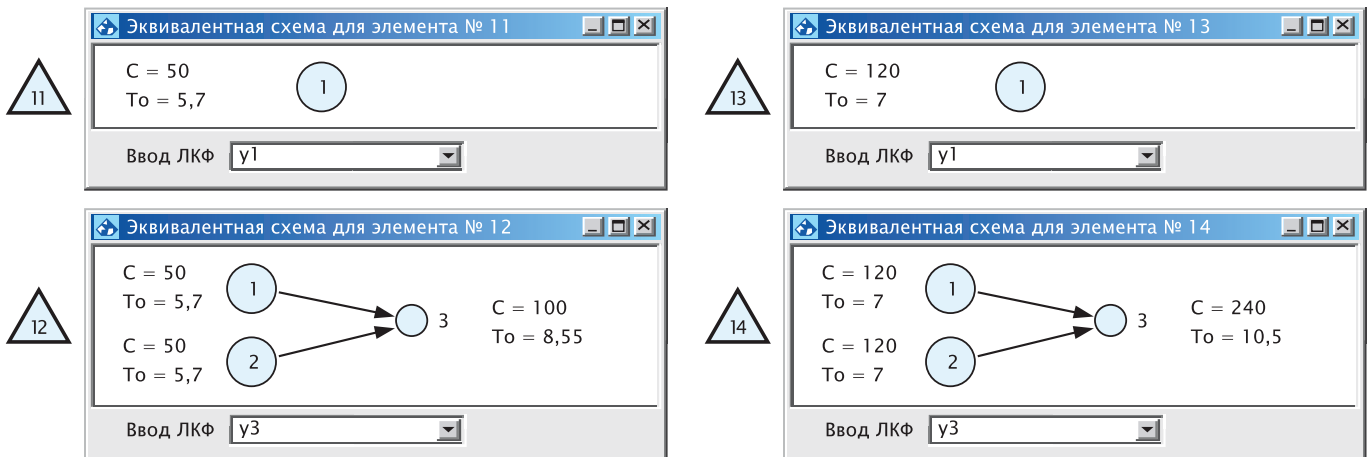


Рис. 2. Варианты реализации подсистемы первичного измерения температуры

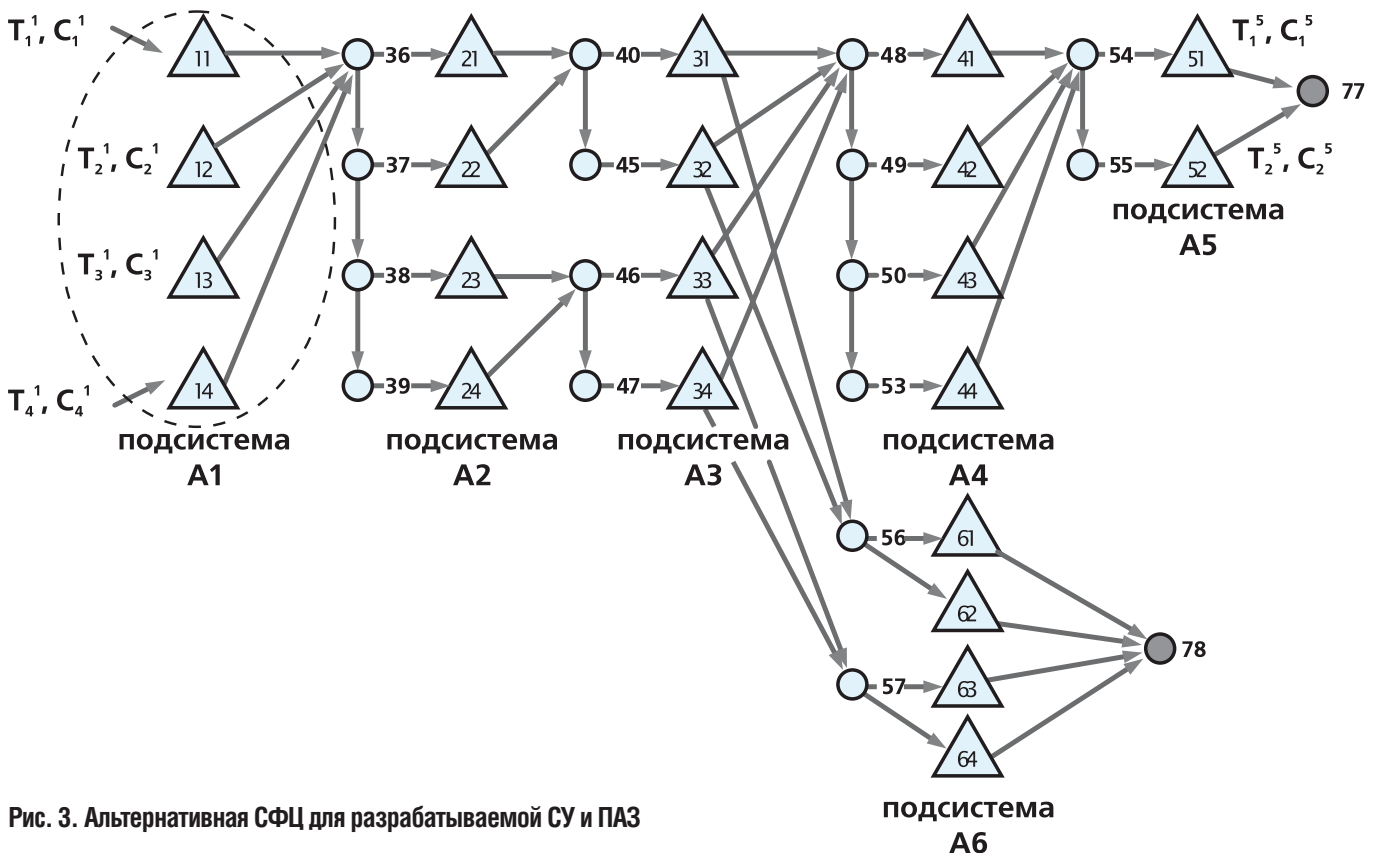


Рис. 3. Альтернативная СФЦ для разрабатываемой СУ и ПА3

обобщенной структурной схемы комплекса технических средств АСУТП, с выделением отдельных подсистем.

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 ПА3 разделяется на 6 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 рисунке 3 представлены варианты реализации одной из подсистем рассматриваемого примера АСУТП, в виде эквивален-

тированных вершин. Рядом с эквивалентированными вершинами показаны их эквивалентные СФЦ.

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.

На альтернативной СФЦ с помощью фиктивных вершин задаются критерии успешного функционирования f_j , которые представляют собой события реализации функций АСУТП (контроля, регулирования, противоаварийной защиты), заданных в техническом задании на проектирование. В рассматриваемом примере, критерием функционирования СУ и ПА3 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].

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.

Методы технико-экономического обоснования обеспечения надежности структурно-сложных технических систем

A1	A2	A3	A4	A5	A6
11 $C_1^1 = 50$ $T_1^1 = 5,7$	21 $C_1^2 = 200$ $T_1^2 = 48$	31 $C_1^3 = 1500$ $T_1^3 = 12$	41 $C_1^4 = 700$ $T_1^4 = 20$	51 $C_1^5 = 1500$ $T_1^5 = 3$	61 $C_1^6 = 180$ $T_1^6 = 54$
12 $C_2^1 = 120$ $T_2^1 = 7$	22 $C_2^2 = 250$ $T_2^2 = 40$	32 $C_2^3 = 3800$ $T_2^3 = 16$	42 $C_2^4 = 600$ $T_2^4 = 24$	52 $C_2^5 = 3000$ $T_2^5 = 4,5$	62 $C_2^6 = 170$ $T_2^6 = 50$
13 $C_3^1 = 100$ $T_3^1 = 8,55$	23 $C_3^2 = 400$ $T_3^2 = 72$	33 $C_3^3 = 9000$ $T_3^3 = 28$	43 $C_3^4 = 1400$ $T_3^4 = 30$		63 $C_3^6 = 360$ $T_3^6 = 81$
14 $C_4^1 = 240$ $T_4^1 = 10,5$	24 $C_4^2 = 500$ $T_4^2 = 60$	34 $C_4^3 = 12000$ $T_4^3 = 40$	44 $C_4^4 = 1200$ $T_4^4 = 36$		64 $C_4^6 = 340$ $T_4^6 = 75$

Таблица 1. Результаты расчетов различных вариантов реализации технических подсистем

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

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

$$D = \{x \in A / P_{F_1}(x) \geq 0,8, P_{F_2}(x) \geq 0,9\};$$

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 уе, при максимально возможных вероятностях реализации системой своих функций в течение 8760 часов:

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

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

D – множество допустимых значений x ;

β_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 ПАЭ. 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 ПАЭ, а в задаче 2 (392 варианта) – произведена оценка 28 вариантов.

ЭТАП 6. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА

■ 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:

$$x^0 = (13, 23, 33, 42, 52, 64)$$

$$C^0 = 13440$$

$$P_{F_1}(x^0) = 0,8188274$$

$$P_{F_2}(x^0) = 0,9474254$$

■ 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 опти-

мальных вариантов. На множестве Парето решается задача выбора оптимального варианта используя линейную свертку вероятностей реализации функций системы.

$$x^0 = (14, 23, 33, 44, 52, 63)$$

$$C^0 = 14200$$

$$P_{F1}(x^0) = 0,8698332$$

$$P_{F2}(x^0) = 0,9470943$$

МЕТОД ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МОДЕРНИЗИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ С ОПТИМАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РЕСУРСОВ ПО ЕЁ ЭЛЕМЕНТАМ

Решение задачи повышения надежности модернизируемой системы с оптимальным распределением ресурсов по элементам заключается в следующем:

Производится замена существующих элементов системы более надежными или их дублирование, при этом цена модернизации не превышает заданное значение C_0 , а отношение вероятностей реализации системных функций до и после модернизации является максимально возможным.

$$C' - C'' \leq C_0, \frac{P_j''}{P_j'} \rightarrow \max, j = 1, \dots, J$$

где C_0 – стоимость модернизации, J – количество системных функций, P_j' – вероятность реализации функции j системой до модернизации, P_j'' – вероятность реализации функции j системой после модернизации, C' – стоимость системы до модернизации, C'' – стоимость системы после модернизации

Предлагаемый метод предусматривает расчет положительных вкладов для каждой подсистемы АСУТП. Сначала рассчитывается положительный вклад каждой подсистемы A_n по функции $j B_{nj}^+$ как значение абсолютного изменения системного показателя $P_i(t)$ вероятности реализации функции j при изменении вероятности безотказной работы подсистемы A_n от ее текущей величины до единицы. Затем для каждой подсистемы определяется суммарный положительный вклад как сумма положительных вкладов в надежность реализации каждой функции.

$$B_{\Sigma n}^+ = \sum_{j=1}^J B_{nj}^+$$

Для подсистемы с максимальным суммарным положительным вкладом оцениваются различные варианты проведения модернизации. Оценка заключается в вычислении показателя, равного отношению изменения надежности реализации функций системой к стоимости модернизации (удельное изменение надежности). Выбирается такая стратегия принятия решения для данной подсистемы (элемента суперграфа), при которой отношение суммы приращений надежности реализации системных функций к стоимости модернизации является максимальным.

После принятия решения по модернизации выбранной подсистемы сумма средств на дальнейшую модернизацию системы уменьшается на значение равное стоимости модернизации рассматриваемой подсистемы. Процедура модернизации продолжается до тех пор пока не будут исчерпаны все средства на проведение модернизации.

На основе данных положений, разработан метод решения двух типов задач модернизации.

Формализованное описание метода решения первой задачи модернизации системы:

$$\delta = (\delta_1, \dots, \delta_n) - \text{поэлементный вариант АСУТП,}$$

$$\delta \in A, A = \varphi \{A_1, \dots, A_N\},$$

φ – структурная функция АСУТП, состоящей из N подсистем, A_i – подсистема АСУТП,

$\delta_i \in A_i, A_i = \{a_1, \dots, a_k\}, k$ – количество вариантов технической подсистемы A_i .

Требуется найти, такой вариант построения АСУТП $x' = (x'_1, \dots, x'_n)$, при котором

$$C(x') \leq C_0, \sum_{j=1}^J \beta_j (P_j(x') - P_j(x)) \rightarrow \max_{x \in A}, j = 1, \dots, J.$$

Где $P_j(x)$ – вероятность безотказной работы j -ой функции АСУТП, J – количество функций АСУТП, $C(x')$ – стоимость модернизации АСУТП, $P_j(x')$ – вероятность безотказной работы j -ой функции АСУТП после модернизации, β_j – коэффициенты, отражающие разную значимость функций системы. Далее задача решается при помощи следующей процедуры.

Шаг 1. Анализ вариантов модернизации системы

1.1 Определение возможных вариантов технических элементов и подсистем, из состава которых выполняется выбор для модернизации существующей системы.

1.2 Исключение из возможных вариантов модернизации, элементов и подсистем модернизируемых на предыдущем этапе, а также стоимость которых превышает оставшийся объем средств на модернизацию. Если после этих действий множество возможных вариантов технических элементов и подсистем из которых возможен выбор для модернизации существующей системы, окажется пустым то процедура модернизации заканчивается.

1.3 Расчет в ПК АРБИТР суммарных положительных вкладов отдельных подсистем.

Шаг 2. Выбор модернизируемой подсистемы

2.1 Выбор подсистемы, которая обладает максимальным суммарным положительным вкладом;

- анализ и сравнение возможных вариантов проведения модернизации подсистемы: для каждого варианта рассчитывается отношение изменения вероятности выполнения всех системных функций к стоимости модернизации (далее – показатель модернизационной привлекательности)

$$\frac{\sum_{j=1}^J \beta_j (P_j(x'_k) - P_j(x))}{C(x'_k) - C(x)}, j = 1, \dots, J,$$

где k – номер варианта реализации подсистемы A_n

Шаг 3. Выбор варианта модернизации подсистемы

3.1 Выбор варианта модернизации подсистемы, обладающего

Методы технико-экономического обоснования обеспечения надежности структурно-сложных технических систем

максимальным показателем модернизационной привлекательности.

3.2 Определение остатка средств на модернизацию.

3.3 Переход на Шаг 1.

Формализованное описание метода решения второй задачи модернизации:

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

$x \in A$, $A = \varphi \{A_1, \dots, A_N\}$, φ – структурная функция

АСУТП, состоящей из N подсистем, A_i – подсистема АСУТП,

$x_i \in A_i$, $A_i = \{a_1, \dots, a_k\}$, k – количество вариантов

технической системы A_i .

Требуется найти, такой вариант построения АСУТП

$x' = (x'_1, \dots, x'_n)$, при котором

$$(C_{np} + \tilde{N}_{mod}) \rightarrow \min_{x \in A},$$

$$\text{где } C_{np} = T_p \cdot \sum_{j=1}^J [(1 - \hat{E} \tilde{A}_j(x)) \cdot C_j^h], j = 1, \dots, J$$

где C_{mod} – стоимость модернизации АСУТП, $\hat{E} \tilde{A}_j(x)$ – коэффициент готовности j -ой функции АСУТП, C_j^h – ущерб от отказа j -ой функции ССТС в течении часа, C_{np} – ущерб от отказов за период T_p .

Шаг 1. Анализ вариантов модернизации системы

1.1 Определение возможных вариантов технических элементов и подсистем из состава которых возможен выбор для модернизации существующей системы;

1.2 Исключение из возможных вариантов модернизации, элементов и подсистем модернизируемых на предыдущем этапе.

1.3 Расчет при помощи ПК АРБИТР положительных вкладов

отдельных элементов и подсистем.

Шаг 2. Выбор модернизируемой подсистемы

2.1 Выбор подсистемы, которая обладает максимальным суммарным положительным вкладом.

2.2 Анализ и сравнение возможных вариантов проведения модернизации: для каждого варианта рассчитывается экономический эффект от модернизации ССТС

$$T_p \cdot \sum_{j=1}^J [\hat{E} \tilde{A}_j(x'_k) \cdot C_j^h - C(x'_k)], j = 1, \dots, J$$


Шаг 3. Выбор варианта модернизации подсистемы

3.1 Выбор варианта модернизации подсистемы, для которого экономический эффект от модернизации максимален;

3.2 Если максимальный экономический эффект отрицателен, то процедура модернизации заканчивается, если положительна то переходим на Шаг 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методы технико-экономического обоснования 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:

- ГОСТ 24.701-86. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1986. - 17 с.
- ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. - 19 с.
- АРБИТР, Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0. Автор: Можяев 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.
- Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. - 68с.
- Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. // Пер. с англ. - М.: Наука, 1984. - 328 с.
- Нозик А.А. Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб, 2005, с. 49-96.
- 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, с. 347 - 353.
- Дивеев А.И., Северцев Н.А. Метод выбора оптимального варианта технической системы. М.: ВЦ РАН. 2003. - 106 с.