

# Модернизированная методика проектирования сложных блоков программно-технических комплексов с учетом их параметров надежности

Д.М. Уткин<sup>1</sup>, В.К. Зольников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Концерн «Созвездие», utkin64@yandex.ru

<sup>2</sup>Воронежская государственная лесотехническая академия, wkz@rambler.ru

**Аннотация** — Представлена методика проектирования сложных блоков с учетом интеграции их параметров надежности в САПР. Проведена экспериментальная оценка адекватности моделирования показателей надежности технических систем.

**Ключевые слова** — сложные блоки, надежность, САПР, моделирование, вероятность безотказной работы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке перед российской экономикой и промышленностью была поставлена задача формирования научно-технического задела для создания новейших образцов вооружений и гражданской техники, повышения конкурентоспособности отечественных отраслей и предприятий. Рост экономических показателей, увеличение валового продукта и модернизация вооруженных сил были определены государством в числе стратегических приоритетов нашей страны [1], [2]. Для решения этих задач, а также с целью динамического развития науки, необходимо большое внимание уделять перспективным проектам и разработкам, являющимися основой развития российской экономики и промышленности.

Модернизация промышленности в целом и оборонно-промышленного комплекса, в частности, является, кроме того, залогом безопасности и продвижения национальных интересов нашей страны во всем мире, что делает актуальность работы по внедрению перспективных и инновационных решений в промышленность еще более значимой.

Одним из важнейших направлений в этой области является создание перспективных и высоконадежных программно-технических комплексов (ПТК). Особая роль при этом отводится разработке комплексов, включенных в перечень критических технологий Российской Федерации и предназначенных для авиационных, космических отраслей промышленности, химических производств и атомных реакторов.

Высокая степень автоматизации, использование в тяжелых условиях эксплуатации и востребованность данных комплексов приводит к тому, что помимо основных функций назначения, к ПТК предъявляется ряд жестких требований, направленных на сокращение длительности и стоимости разработки на стадии проектирования, а также повышение надежности комплексов.

В связи с этим становится крайне актуальна задача разработки сложных блоков, составляющих основу программно-технических комплексов и сохраняющих свою работоспособность при воздействии целого спектра дестабилизирующих факторов [3]. Ее решение требует совершенствования, в первую очередь, средств автоматизированного проектирования (САПР), которые позволят разрабатывать изделия, работающие в указанных условиях.

Эти причины потребовали провести совершенствование методики проектирования и САПР в части автоматизации проектирования сложных блоков высоконадежных программно-технических комплексов специального назначения, функционирующих, в том числе, и в условиях радиационного воздействия.

## II. ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ БЛОКОВ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ

В общем виде методику проектирования сложных блоков предлагается представить в виде схемы, включающей идентификацию объекта, определение целей и задач расчета надежности, выбор метода расчета, составление расчетных моделей для показателей надежности и получение расчетных показателей надежности, интеграцию математической модели параметров надежности в САПР сквозного проектирования, оформление и представление результата [4].

Предлагаемая схема обобщенной методики проектирования сложных блоков представлена на рисунке 1.

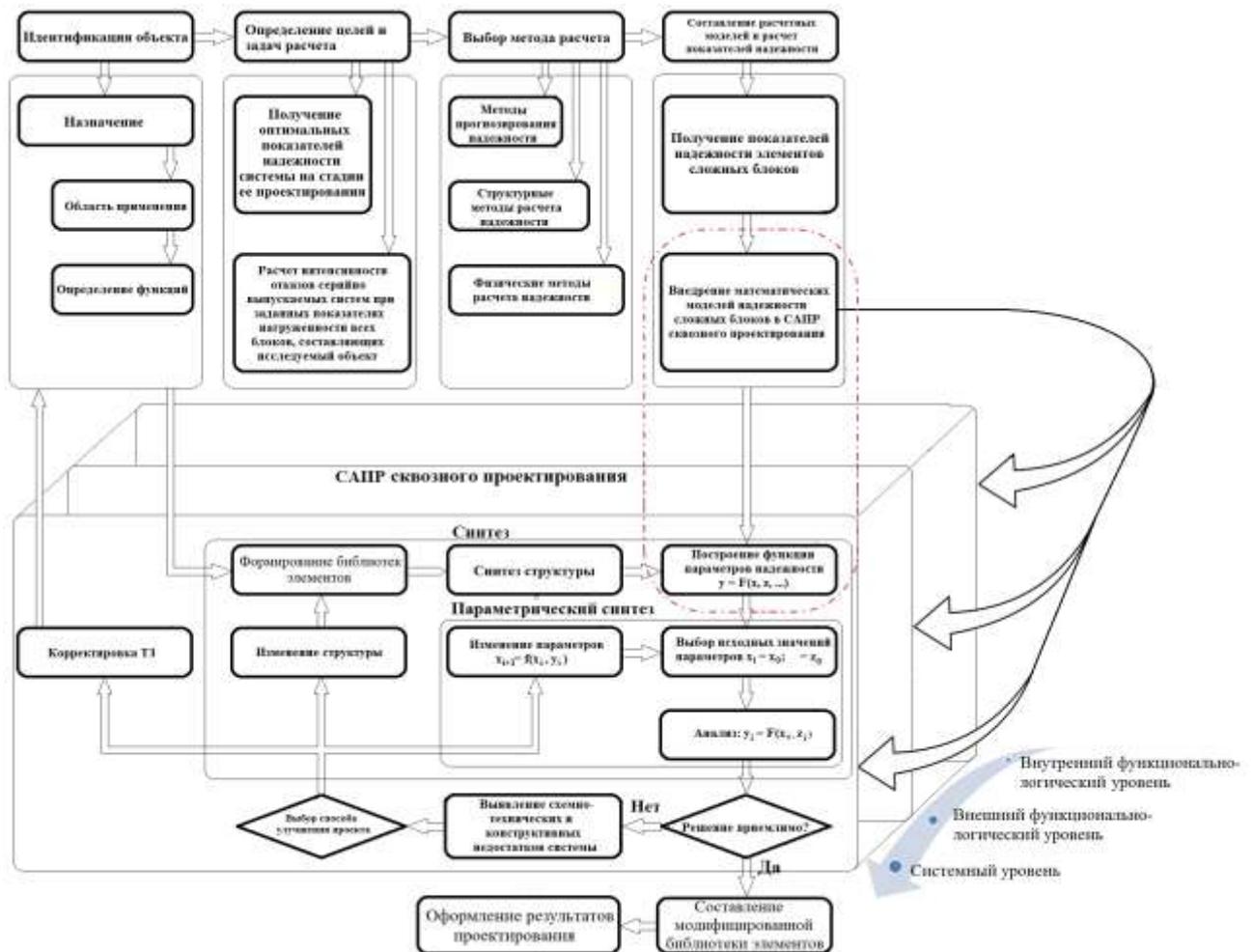


Рис. 1. Обобщенная методика проектирования сложных блоков

Суть предложенной методики состоит в получении модифицированной библиотеки функциональных блоков, используемых в программно-технических комплексах, с учетом показателей надежности на основе использования мощных математических алгоритмов и требований ТЗ, выданных на начальном этапе проектирования. При этом использование средств автоматизированного проектирования позволяет наиболее точно учесть все факторы, влияющие на конечный результат.

Новизна данной методики заключается во внедрении в САПР сквозного проектирования математической модели показателей надежности сложных блоков ПТК, отличающейся от существующих моделей комплексным учетом радиационного воздействия, показателей старения и режима работы сложных блоков. Кроме того, внедрение данной математической модели надежности сложных блоков осуществляется как на системном уровне проектирования, так и на функционально-логическом уровне, который, в свою очередь, предлагается разделить на два модуля: внутренний и внешний. На внешнем модуле блоки представляются логическими функциональными узлами, выполняющими определенные целевые функции назначения, а

на внутреннем уровне функциональные узлы декомпозируются до отдельных элементов.

Данный подход позволяет разработать наиболее полную модифицированную библиотеку, включающую сложные блоки, функциональные узлы и элементы, учитывающие радиационную компоненту и динамический режим работы технических модулей [5] при минимальных временных и материальных затратах. Кроме того, используемые средства позволяют работать с САПР как зарубежных, так и отечественных производителей.

### III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ БЛОКОВ

#### A. Теоретическая основа построения математической модели сложных блоков

Исходя из материала, изложенного в предыдущем разделе, можно утверждать, что для учета комплексных характеристик надежности сложных блоков особое внимание необходимо уделить разработке математической модели технических систем на стадии проектирования, описывающих поведение функциональных блоков с учетом вероятности безотказной работы.

При этом основная дилемма состоит в нахождении компромисса между простотой описания, что является одной из предпосылок понимания, и необходимостью учета многочисленных поведенческих характеристик сложной системы. По мнению авторов, целесообразно выделить аспекты построения математической модели сложных блоков, иллюстрированные на рисунке 2.

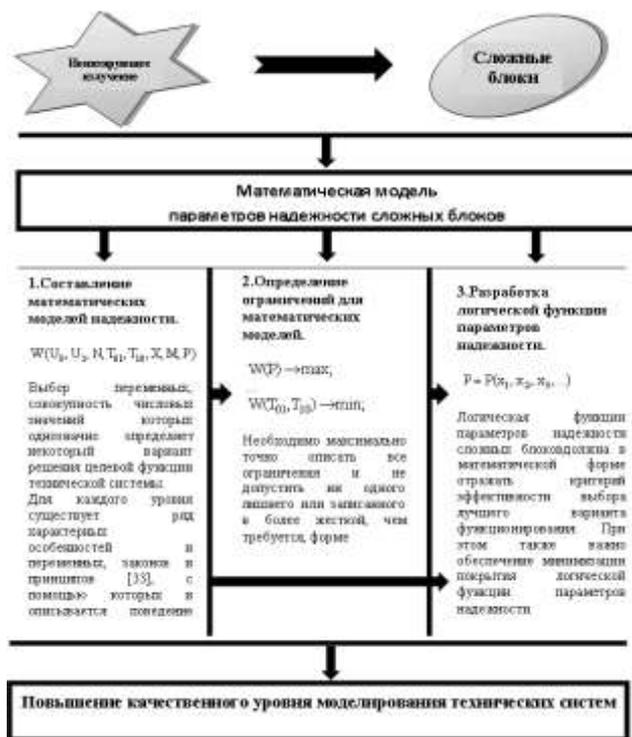


Рис. 2. Аспекты построения математической модели сложных блоков

После построения математической модели необходимо провести ее интеграцию на системный и функционально-логический уровни проектирования технических систем.

На завершающем этапе с помощью полученной математической модели сложных блоков определяются выходные параметры технических систем. Полученные значения сравниваются с соответствующими значениями из ТЗ, и принимается решение о дальнейших действиях. В случае неудовлетворения требований ТЗ возможны следующие этапы проектирования: параметрическая оптимизация; изменение структуры ПТК; корректировка ТЗ.

Данные этапы проводятся циклически до удовлетворения требованиям надежности, предъявляемым к программно-техническим комплексам специального назначения.

#### В. Формализованное представление математической модели сложных блоков

В основу разработки формализованного представления математической модели сложных блоков высоконадежных программно-технических комплексов положены следующие суждения [6] - [9].

Каждая модель блока ПТК на этапе функционально-логического моделирования может описываться определенными параметрами, среди которых оператор, определяющий функционирование блока, нагрузочная способность блока, задержки переключения и т. п.

При этом преобразование входных и выходных значений параметров каждого сложного блока может описываться оператором, определяющим его функционирование:

$$Z = G(A), \quad (1)$$

где  $A$  – вектор входных параметров блока,  $Z$  – вектор выходных параметров блока,  $G$  – логическая функция преобразования входных значений блока в выходные с учетом изменения задержек переключения и нагрузочной способности, зависящей от температуры и дозы радиационного воздействия.

Для более точного описания преобразования входных и выходных значений параметров сложного блока в оператор (1) предложено ввести дополнительный параметр – вероятность безотказной работы  $P$ . Тогда

$$Z = \{U_0, U_1, N, T_{01}, T_{10}, X, M, P\} \quad \text{и}$$

$$A = \{U_0, U_1, N, T_{01}, T_{10}, X, M, P\}, \quad (2)$$

где  $U_0$  – выводы блока, принимающие значение логического 0,  $U_1$  – выводы блока, принимающие значение логического 1,  $N$  – нагрузочная способность блока,  $T_{01}$  – время задержки переключения блока из логического нуля в логическую единицу,  $T_{10}$  – время задержки переключения блока из логической единицы в логический нуль,  $X$  – компонента радиационного воздействия,  $M$  – компонента режима работы блока,  $P$  – компонента вероятности безотказной работы блока.

Для определения компоненты  $P$ , входящей в соотношение (2), к известной зависимости вероятности безотказной работы от времени  $P(t)$  предложено добавить дополнительные члены, которые описывают зависимость вероятности безотказной работы от дозы облучения –  $P(X)$ , и взаимовлияние  $P(t)$  на  $P(X)$  с учетом режима работы блока  $M$ .

Экспериментально доказано, что вероятность отказа системы при получении малой дозы радиации с течением времени определяется не аддитивно, в связи с чем её предложено описать зависимостью

$$Q(X, t) = Q(X) + Q(t) + k \cdot Q(X) \cdot Q(t), \quad (3)$$

где  $Q(X, t)$  – вероятность отказа систем вследствие воздействия малой дозы радиации с течением времени,  $k$  – коэффициент взаимовлияния  $Q(X)$  и  $Q(t)$ .

Принимая во внимание [10], что

$$P(X, t) = 1 - Q(X, t), \quad (4)$$

и подставляя в формулу (4) выражение (3), получим

$$P(X, t) = M \cdot [P(t) + P(X)] - k \cdot (1 - P(t)) \cdot (1 - P(X)) - 1 \quad (5),$$

где для более точного описания вероятности безотказной работы, входящей в формулу (2), предложено также учитывать режим работы сложных блоков  $M$ , то

есть учитывать износостойкость функциональных модулей; коэффициент  $k$  ( $-1 \leq k \leq 1$ ) вычисляется расчетно-экспериментальными методами. При этом должны выполняться условия:  $0 \leq Q(X, t) \leq 1$ ,  $0 \leq P(X, t) \leq 1$ .

Для определения вероятности  $P(t)$  используется теория структурно-комбинаторного анализа [11] с последовательно-параллельным соединением элементов.

Согласно данной теории, вероятность безотказной работы сложных блоков  $P(t)$  можно представить в виде

$$P(t) = r \cdot \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m \left[ 1 - \left( \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_{ij} t) \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $r$  – коэффициент восстановления, вводимый для класса технических систем, характеризуемых восстанавливаемостью [12],  $0 < r < 1$ .

Вероятность безотказной работы сложных блоков  $P(X)$  также можно представить в виде

$$P(X) = 1 - \prod_{j=1}^m \left[ 1 - \left( \prod_{i=1}^n \exp(-\tau_{ij} \cdot D) \right) \right], \quad (7)$$

где  $\tau_{ij}$  – интенсивность отказов элемента сложного блока с учетом накопленной дозы радиации  $D$ .

Подставляя формулы (6) и (7) в (5), получим обобщенную логическую функцию параметров надежности сложных блоков, функционирующих в условиях воздействия радиации:

$$P(X, M, t) = M \cdot \left\{ r \cdot \left( 1 - \prod_{j=1}^m \left[ 1 - \left( \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_{ij} t) \right) \right] \right) (1 + k \cdot \prod_{j=1}^m \left[ 1 - \left( \prod_{i=1}^n \exp(-\tau_{ij} \cdot D) \right) \right]) - (1 + k) \cdot \prod_{j=1}^m \left[ 1 - \left( \prod_{i=1}^n \exp(-\tau_{ij} \cdot D) \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

Детализированный вид коэффициента восстановления  $r$  получен в работе [12] и представляется как

$$r = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_{01} \lambda_{12} \cdot \dots \cdot \lambda_{(i-1)i}}{\mu_{10} \mu_{21} \cdot \dots \cdot \mu_{i(i-1)}}} \cdot \left[ \prod_{i=1}^k \frac{\lambda_{01} \cdot \dots \cdot \lambda_{(k-1)k}}{\mu_{k(k-1)} \cdot \dots \cdot \mu_{10}} \right]. \quad (9)$$

Полученное формализованное представление математической модели параметров надежности сложных блоков позволяет на наиболее ответственном этапе разработки ПТК – этапе проектирования – получать количественную оценку показателей надежности функциональных модулей в условиях радиационного воздействия с учетом режима работы блоков и факторов деградации технических систем от старения.

#### IV. АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ БЛОКОВ В ОБЩИЙ МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Для получения библиотеки элементов ПТК разработана и предложена алгоритмическая основа интеграции показателей надежности сложных блоков в общий маршрут проектирования программно-технических

комплексов. Новизна предложенного алгоритмического аппарата состоит во внедрении расчетных формул параметров надежности сложных блоков, учитывающих различные деградационные факторы, в САПР. Обобщенный вид алгоритмической основы интеграции параметров надежности в общий маршрут проектирования представлен на рисунке 3. Опишем кратко данный маршрут проектирования.

На основе требований ТЗ, анализа среды применения ПТК и экспериментальных данных, таких как наработка на отказ, производится оценка показателей надежности функциональных элементов из состава сложных блоков программно-технических комплексов. При этом используются упрощенные математические модели. Данный этап отличается простотой реализации, зачастую в ущерб точности, однако с помощью подобных расчетов формируется общая картина качества функционирования элементов, сложных блоков.

Для определения показателей надежности модулей в целом необходимо, прежде всего, провести декомпозицию его на функциональные узлы, которые в свою очередь, представить в виде отдельных элементов. Данный этап проводится стандартными средствами САПР сквозного проектирования.

Устанавливаются возможные комбинации логических связей элементов и подсистем, на основе которых с использованием разработанной функции (8) производится уточнение параметров надежности. При этом определяется количество возможных вариантов работы сложных блоков и производится согласование возможных решений выполнения основной целевой функции программно-технического комплекса с заданными требованиями ТЗ и установленным критерием функционирования.

Следующим этапом при проектировании высоконадежных модулей, составляющих программно-технические комплексы, является определение показателей надежности блоков при воздействии на них радиации. Данная задача решается с использованием существующих библиотек «неисправных» функциональных элементов и узлов с учетом показателей надежности в условиях воздействия статического ионизирующего излучения.

Полученные параметры поражения элементов, с учетом воздействия радиации интегрируются в функцию показателей надежности (8), после чего происходит определение вероятности безотказной работы сложных блоков на функционально-логическом и системном уровнях, соответственно.

С помощью полученных расчетных значений формируется модифицированная библиотека элементов, содержащая точные показатели надежности сложных блоков, в том числе и при воздействии на них ионизирующего радиационного излучения.

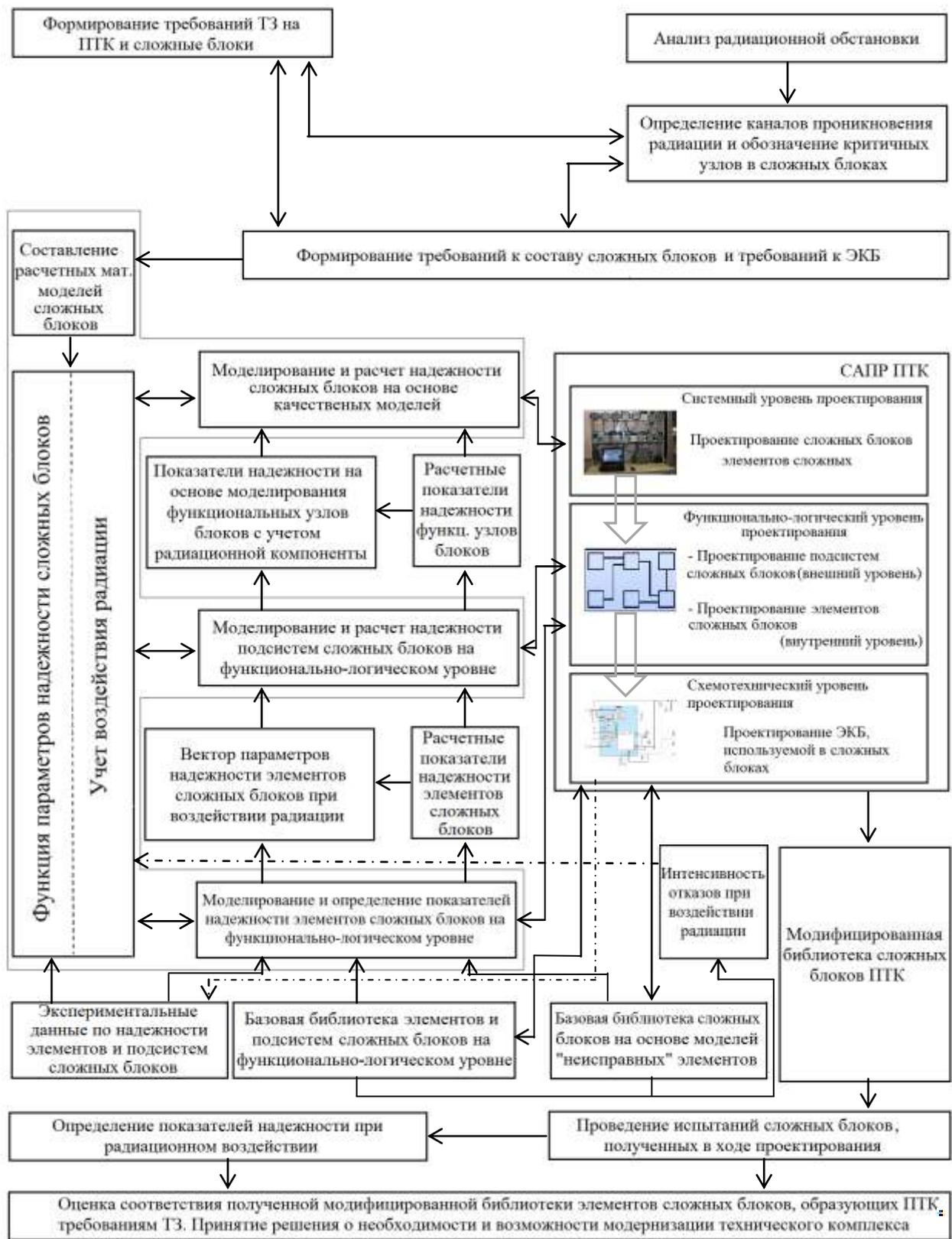


Рис. 3. Алгоритмическая основа интеграции показателей надежности сложных блоков в общий маршрут проектирования программно-технических комплексов

После разработки модифицированной библиотеки сложных блоков программно-технических комплексов производится ее тестирование экспериментальными методами, на основе которых формируется оценка соответствия полученной базы блоков требованиям ТЗ. Также на этом этапе принимается решение о возможных доработках и конструктивных улучшениях программно-технических комплексов.

#### V. ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ БЛОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДЛОЖЕННЫХ СРЕДСТВ

Для оценки адекватности моделирования показателей надежности технических систем проведен автоматизированный расчет вероятности безотказной работы сложных блоков [13], разрабатываемых ОАО «Концерн Созвездие» (г. Воронеж), с помощью предложенных средств, и проведено сравнение с экспериментальными значениями, полученными в ходе проектирования данных модулей. Результаты сравнения приведены на рисунке 4.

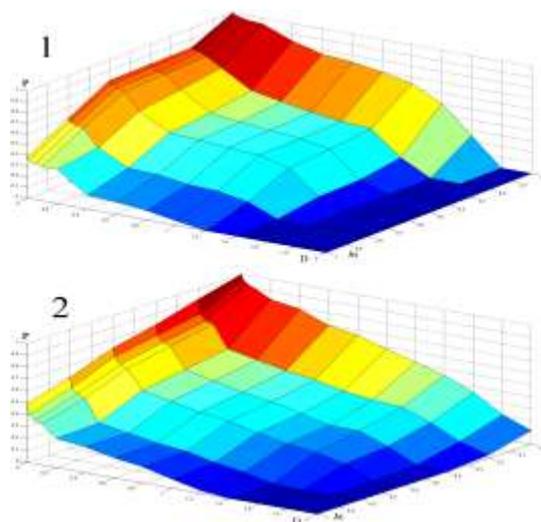


Рис. 4. Вероятность безотказной работы сложного блока. 1 – расчет; 2 - эксперимент

Результаты сравнения данных, представленных на рисунке, показывают достаточное совпадение расчетных и экспериментальных показателей надежности, которые дополняют библиотеку функциональных блоков и подсистем, используемую в среде САПР Cadence при проектировании сложных программно-технических комплексов специального назначения.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описаны средства определения параметров надежности сложных блоков, отличающиеся комплексным учетом механизмов старения технических систем, режимов работы и условий воздействия статического ионизирующего излучения. Данные средства внедрены в САПР, что способствует автоматизации проектирования востребованных программно-

технических комплексов, используемых в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Апполонов, И.В. Надежность и безопасность сложной наукоемкой техники двойного назначения XXI в. / И.В. Апполонов, Н.И. Хариев // Горизонты экономики. 2012. № 1. С. 40-59.
- [2] Кечиев, Л.Н. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / Л.Н.Кечиев, П.В. Степанов. М.: Изд. дом «Технологии», 2005. 219 с.
- [3] РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России. 2001. 60 с.
- [4] Уткин, Д.М. Обобщенная методика проектирования сложных блоков, составляющих программно-технические комплексы специального назначения / Д.М. Уткин, К.В. Зольников // Моделирование систем и процессов. 2013. № 3. С. 83-87.
- [5] Колесов, Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 224 с.
- [6] Ачкасов, В.Н. Методы проектирования микросхем, стойких к одиночным событиям / В.Н. Ачкасов, В.А. Смерек, Д.М. Уткин, К.В. Зольников // Моделирование систем и процессов. 2012. № 3. С. 17-20.
- [7] Ачкасов, В.Н. Обобщенный критерий надежности интегральных схем и методы защиты от одиночных сбоя в цифровых устройствах на стадии проектирования / В.Н. Ачкасов, В.А. Смерек, Д.М. Уткин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 76. С. 387-398.
- [8] Уткин, Д.М. Математическая модель сложных функциональных блоков, функционирующих в условиях воздействия радиации / Д.М. Уткин, В.В. Лавлинский, В.А. Скляр // Моделирование систем и процессов. 2013. № 3. С. 88-91.
- [9] Уткин, Д.М. Обобщенная формула надежности программно-технических комплексов специального назначения / Д.М. Уткин // Моделирование систем и процессов. 2013. № 2. С. 82-86.
- [10] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.
- [11] Нечипоренко, В.И. Структурный анализ и методы построения надежных систем: монография. М.: Сов. Радио, 1968. 256 с.
- [12] Уткин, Д.М. Интеграция параметров надежности в средства автоматизированного проектирования программно-технических комплексов специального назначения / Д.М. Уткин // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 4 (54). С. 70-74.
- [13] Уткин Д.М. Проблемно-ориентированное программное обеспечение для расчета показателей надежности сложных блоков программно-технических комплексов и его интеграция в САПР сквозного проектирования / Д.М. Уткин, В.К. Зольников // Моделирование систем и процессов. 2013. № 3. С. 48-51.