

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В КОНСТРУИРОВАНИИ И ТЕХНОЛОГИИ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Раздел “Применение имитационного моделирования для прогнозирования
и оценки работоспособности изделия при разработке микроселектронных
интегральных структур”**

**Учебное пособие по курсу
“Автоматизация конструкторско-технологического
проектирования электронных вычислительных средств”**

Под редакцией Ю.И.Нестерова

**Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана
2000**

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
КОНСТРУИРОВАНИИ И ТЕХНОЛОГИИ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Раздел “Применение имитационного моделирования для прогнозирования и
оценки работоспособности изделия при разработке микроэлектронных
интегральных структур”**

**Учебное пособие по курсу
“Автоматизация конструкторско-технологического проектирования
электронных вычислительных средств”**

Под редакцией Ю.И.Нестерова

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана

2000

УДК 681.14

ББК 32.844-02

М74

Рецензент Г.Р. Сагателян

М74 Информационные технологии в конструировании и технологии микроэлектроники. Раздел «Применение имитационного моделирования для прогнозирования и оценки работоспособности изделия при разработке микроэлектронных интегральных структур» /В.П. Григорьев, Ю.И. Нестеров, Д.В. Черепанов,- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. -39 с.

Приведены основы имитационного моделирования. Рассмотрены: пример имитационного моделирования работоспособности субмикронной интегральной структуры, механизмы возникновения отказов в контактных структурах, использование метода конечных элементов для моделирования отказов, моделирование механических напряжений, электростатического потенциала и токов, диффузионных процессов в объеме контактного соединения структура программы-имитатора отказа контакта металл-полупроводник.

Для студентов старших курсов и дипломников, обучающихся по специальностям «Проектирование и технология РЭС» и «Конструирование и технология ЭВС»

Ил. 5. Библиогр. 7 назв.

УДК 681.14

ББК 32.844-02

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000

Введение

Дисциплина “Моделирование технических объектов конструкторско-технологического проектирования электронной аппаратуры входит как составная часть в курс “Автоматизация конструкторско-технологического проектирования ЭВС (РЭС). Цель данного учебного пособия - выработка теоретических и практических навыков построения имитационных моделей и принятия на их основе конструкторско-технологических решений при проектировании микроэлектронной аппаратуры.

Обеспечение конкурентоспособности отечественных изделий микроэлектроники неразрывно связано с решением проблем повышения качества и надежности при минимальных затратах на этапах проектирования, производства и эксплуатации. В связи с этим особое значение приобретает применение современных информационных технологий для синтеза оптимальных конструкторско-технологических решений на основе методов имитационного моделирования в САПР.

1. Разработка новых технологий в микроэлектронике

Современное развитие микроэлектроники на основе применения новых технологических процессов и новых материалов стимулировало ускоренное развитие методов моделирования характеристик приборов интегральных схем. Для создания СБИС необходимо машинное моделирование на нескольких уровнях — технологическом, приборном, схемотехническом и системном.

Структуры СБИС относятся к классу сложных систем. Реальные сложные системы можно исследовать с помощью двух типов математических моделей: аналитических и имитационных [1]. В аналитических моделях поведение сложных систем записывается в виде некоторых функциональных соотношений или логических условий. Наиболее полное исследование удастся провести в том случае, когда получены явные зависимости, связывающие искомые величины с параметрами сложной системы и начальными условиями ее изучения. Однако это удастся выполнить только для сравнительно простых систем. Для сложных систем зачастую приходится идти на упрощения представления реальных явлений, дающие возможность описать их поведение и представить взаимодействия между компонентами сложной системы.

При исследованиях субмикронных пленок аналитическая модель во многих случаях оказывается недостаточно адекватной реальным физическим процессам вследствие большого разнообразия наблюдаемых явлений, отличающихся высокой сложностью и, почти всегда, нелинейностью во времени и по пространственным координатам [2].

Ситуация, когда явления в сложной системе настолько сложны и многообразны, что построенная аналитическая модель становится слишком грубым приближением к действительности, вынуждает использовать имитационное моделирование. В имитационной модели (ИМ) поведение компонент сложной системы описывается набором алгоритмов, которые затем реализуют ситуации, возникающие в реальной системе. Моделирующие алгоритмы позволяют по исходным данным и фактическим значениям параметров системы отобразить реальные явления в системе и получить сведения о возможном поведении сложной системы для данной конкретной ситуации. Таким образом, имитационное моделирование в большинстве случаев оказывается наиболее удобным средством изучения явлений в сложной системе.

Легко понять аргументы в пользу именно этого инструмента автоматизации проектирования, если рассмотреть другие возможности получения той же самой информации. Есть две альтернативы; лучшая — изготовить приборы и снять характеристики; вторая - использовать более простые модели, основанные либо на одномерных аппроксимациях, либо на экстраполяции данных, полученных в результате исследований приборов, аналогичных тем, которые нас интересуют. Оба подхода обладают как преимуществами, так и недостатками по сравнению с имитационным моделированием.

Лучший способ выяснить все ограничения и определить достоинства любой новой технологии - это изготовление и тестирование реальных приборов. Но поскольку это нужно делать при решении вопроса о развитии каждой технологии, указанный способ является, по-видимому, самым дорогим и долговременным. Приборы, создаваемые для апробации новой СБИС-технологии, могут стоить более 1 млн. дол., на их доводку может уйти до полугода [1].

Имитационное моделирование приборов — весьма эффективный с точки зрения затрат метод определения целесообразности развития той или иной технологии. После выбора конструкции прибора моделирование позволяет избежать проведения множества дорогостоящих экспериментов на матрицах, что, как правило, необходимо для оптимизации нового процесса и структур приборов. Это важно для СБИС-технологий ввиду того, что проектирование приборов носит статистический характер. В современных электронных системах требуется обеспечить функционирование огромного количества приборов.

Выпустить же достаточное количество экспериментальной аппаратуры для тестирования даже самых критических комбинаций статистически допустимых параметров и структур невозможно. Большое количество приборов и наличие

существенных отклонений в структурах от прибора к прибору делают неизбежным статистическое проектирование.

Другое преимущество имитационного моделирования — определенность структуры и физических параметров прибора. Это означает, что информацию, необходимую для проектирования прибора, можно получить до стабилизации нового процесса изготовления приборов. Прибор можно оптимизировать на ранней стадии производства. И, наконец, еще одно существенное преимущество состоит в том, что с помощью имитационного моделирования можно проанализировать функционирование любого прибора.

Используя упрощенные модели и экстраполяцию данных, полученных в результате анализа реально существующих структур, невозможно с достаточной точностью предсказать характеристики вновь создаваемых приборов. Это можно сделать лишь с помощью модели, основанной на фундаментальных положениях физики.

Из достоинств имитационного метода выделим: возможность описания поведения компонент сложной системы на высоком уровне детализации, отсутствие ограничений на вид зависимостей между параметрами ИМ и состоянием внешней среды сложной системы, возможность исследования динамики взаимодействия компонент во времени и пространстве параметров системы. Указанные достоинства обосновывают выбор имитационного метода для моделирования процессов в контактных структурах.

Важно, что при использовании ИМ натурные испытания интегральных приборов заменяются экспериментами с математической моделью реального процесса на ЭВМ с использованием так называемых имитационных надежных систем.

Имитационная система представляет собой машинный аналог реально наблюдаемых процессов изменения надежности, состоящий из закодированной в ЭВМ модели изучаемого явления, внешнего и внутреннего математического обеспечения.

Имитационная модель - есть формализованное описание изучаемого явления на уровне установившихся представлений о его природе.

2. Основы имитационного моделирования

Имитационное моделирование является эффективным средством решения сложных проблем. Имитационные модели могут применяться для:

- исследования границ и структур систем с целью решения конкретных проблем;
- определения и анализа критических элементов, компонентов и точек в исследуемых системах и процессах;
- синтеза и оценки предполагаемых решений;

- прогнозирования и планирования будущего развития исследуемых систем.

Процесс имитационного моделирования начинается с определения подлежащих решению проблем, что в свою очередь определяет состав и границы исследуемой системы. Построение имитационной модели исследуемой системы, хотя и зависит от специфики решаемой проблемы, требует определенной методологической схемы. Имитационный язык обеспечивает исследователя такой схемой, а также осуществляет трансляцию модели в доступную вычислительной системе форму. Вычислительная система, на которой исследуется разработанная имитационная модель, выдает информацию о поведении модели, которая затем может анализироваться в процессе решения проблемы.

В данной главе представлены основные понятия имитационного моделирования и этапы имитационного исследования.

2.1 Построение моделей

Разработка имитационной модели — сложный процесс, который во многом является искусством, но, однако, упрощается, если:

- 1) известны физические законы, описывающие функционирование системы;
- 2) может быть разработано графическое представление системы;
- 3) можно управлять входами, элементами и выходами системы [3].

Процесс моделирования начинается с определения цели разработки модели, на основе которой затем устанавливаются границы системы и необходимый уровень детализации моделируемых процессов.

На рис. 1 представлена схема предполагаемого подхода создания моделей. В описание системы, кроме того, должны быть включены критерии эффективности функционирования системы и оцениваемые альтернативные решения, которые могут рассматриваться как часть модели или как ее входы. Оценки же альтернативных решений по заданным критериям эффективности рассматриваются как выходы модели. Обычно оценка альтернатив требует внесения изменений в описание системы и, следовательно, перестройки модели. Поэтому на практике процесс построения модели является итеративным. После того как на основе полученных оценок альтернатив могут быть выработаны рекомендации, можно приступить к внедрению результатов моделирования. При этом в рекомендациях должны быть четко сформулированы как основные решения, так и условия их реализации.

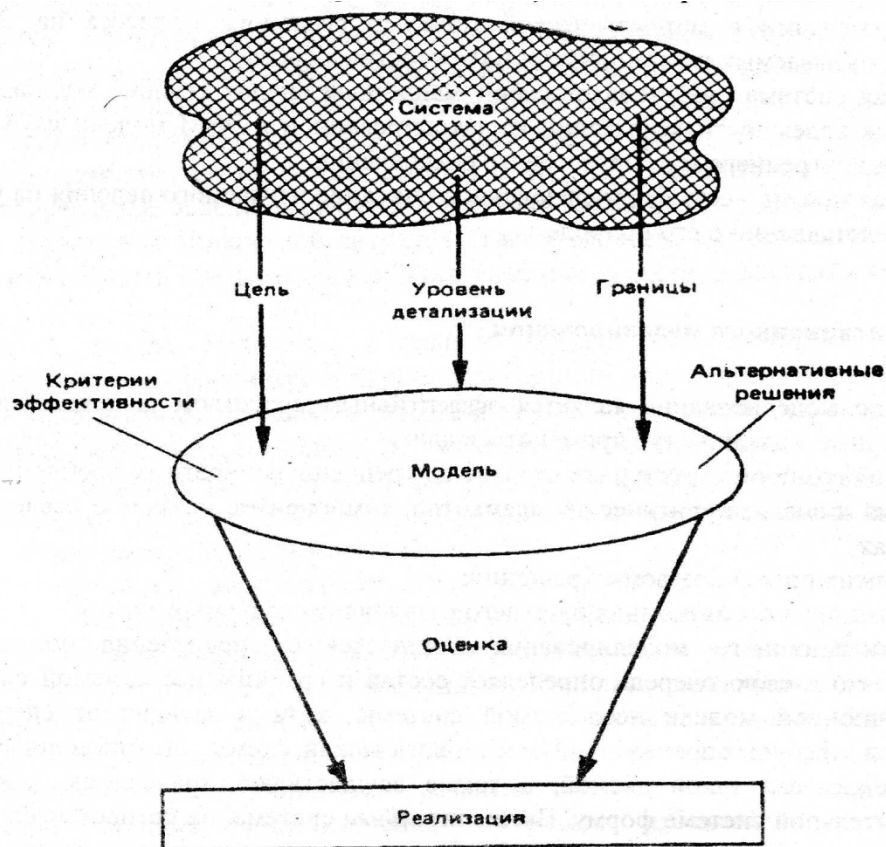


Рис. 1. Процесс построения модели [3].

Имитационному моделированию также свойственна концепция итеративного построения модели, в ходе которого модель изменяется путем добавления новых или исключения некоторых ее элементов и (или) взаимосвязей между ними.

Имитационной моделью называют логико-математическое описание системы, которое может быть исследовано в ходе проведения экспериментов на ЭВМ и, следовательно, может считаться лабораторной версией системы. После окончания разработки имитационной модели с ней проводятся машинные эксперименты, которые позволяют сделать выводы о поведении системы:

- без ее построения и натурального создания, если это проектируемая система;
- без вмешательства в ее функционирование, если это действующая система, экспериментирование с которой или слишком дорого, или небезопасно;
- без ее разрушения, если цель эксперимента состоит в определении пределов воздействия на систему (например, надежность системы).

Таким образом, имитационные модели могут использоваться для проектирования, анализа и оценки функционирования систем.

В имитационном моделировании предполагается, что систему можно описать в терминах, понятных вычислительной системе. Ключевым моментом при этом является выделение и описание состояний системы. Система характеризуется набором

переменных, каждая комбинация значений которых описывает ее конкретное состояние. Следовательно, путем изменения значений переменных можно имитировать переход системы из одного состояния в другое. Таким образом, имитационное моделирование — это представление динамического поведения системы посредством продвижения ее от одного состояния к другому в соответствии с хорошо определенными операционными правилами.

2.2 Процесс имитационного моделирования

Как уже говорилось выше, процесс последовательной разработки имитационной модели начинается с создания простой модели, которая затем постепенно усложняется в соответствии с требованиями, предъявляемыми решаемой проблемой. В процессе имитационного моделирования можно выделить следующие основные этапы:

1. Формулирование проблемы: описание исследуемой проблемы и определение целей исследования.
2. Разработка модели: логико-математическое описание моделируемой системы в соответствии с формулировкой проблемы.
3. Подготовка данных: идентификация, спецификация и сбор данных.
4. Трансляция модели: перевод модели на язык, приемлемый, для используемой ЭВМ.
5. Верификация: установление правильности машинных программ.
6. Валидация: оценка требуемой точности и соответствия имитационной модели реальной системе.
7. Стратегическое и тактическое планирование: определение условий проведения машинного эксперимента с имитационной моделью.
8. Экспериментирование: прогон имитационной модели на ЭВМ для получения требуемой информации.
9. Анализ результатов: изучение результатов имитационного эксперимента для подготовки выводов и рекомендаций по решению проблемы.
10. Реализация и документирование: реализация рекомендаций, полученных на основе имитации, и составление документации по модели и ее использованию.

Первой задачей имитационного исследования является точное определение проблемы и детальная формулировка целей исследования. Как правило, определение проблемы является непрерывным процессом, который обычно осуществляется в течение всего исследования. Оно пересматривается по мере более глубокого понимания исследуемой проблемы и возникновения новых ее аспектов.

Как только сформулировано начальное определение проблемы, начинается этап

построения модели исследуемой системы. Модель включает статистическое и динамическое описание системы. В статистическом описании определяются элементы системы и их характеристики, а в динамическом — взаимодействия элементов системы, в результате которых происходят изменения ее состояния во времени.

Разработчик модели должен понять структуру системы, выявить правила ее функционирования и суметь выделить в них самое существенное, исключив ненужные детали. Модель должна быть простой для понимания и в то же время достаточно сложной, чтобы реалистично отображать характерные черты реальной системы. Наиболее важными являются принимаемые разработчиком решения относительно того, верны ли принятые упрощения и допущения, какие элементы и взаимодействия между ними должны быть включены в модель. Как на этапе формулирования проблемы, так и на этапе моделирования необходимо тесное взаимодействие между разработчиками модели и ее пользователями.

На этапе разработки модели определяются требования к входным данным. Некоторые из этих данных могут уже быть в распоряжении разработчика модели, в то время как для сбора других потребуются время и усилия. Обычно значения таких входных данных задаются на основе некоторых гипотез или предварительного анализа. Чувствительность получаемых результатов к изменению входных данных может быть оценена путем проведения серии имитационных прогонов для различных значений входных параметров. Имитационная модель, следовательно, может использоваться для уменьшения затрат времени и средств на уточнение входных данных.

После того как разработана модель и собраны начальные входные данные, следующей задачей является перевод модели в форму, доступную для ЭВМ. Хотя для программирования имитационной модели может использоваться универсальный язык, применение специализированного имитационного языка имеет существенные преимущества. Помимо сокращения времени программирования использование имитационного языка упрощает разработку модели, так как язык содержит набор понятий для формализованного описания системы.

На этапах верификации и валидации осуществляется оценка функционирования имитационной модели. На этапе верификации определяется, соответствует ли запрограммированная для ЭВМ модель замыслу разработчика. Это обычно осуществляется путем проверки вычислений, а также может быть использован и ряд статистических методов [3].

Установление адекватности имитационной модели исследуемой системе осуществляется на этапе валидации. Валидация модели обычно выполняется на

различных уровнях. Мы рекомендуем выполнять валидацию на уровне входных данных, элементов модели, подсистем и их взаимосвязей. И хотя валидация имитационных моделей достаточно сложна, она является существенно более легкой задачей, чем валидация моделей других типов, например моделей линейного программирования. В имитационных моделях существует соответствие между элементами модели и элементами реальной системы, поэтому проверка адекватности разработанной модели включает сравнение ее структуры со структурой системы, а также сравнение того, как реализованы элементарные функции и решения в модели и системе.

Специальные методы валидации включают установление адекватности путем использования постоянных значений всех параметров имитационной модели или путем оценивания чувствительности выходов к изменению значений входных данных. В процессе валидации сравнение должно осуществляться на основе анализа как реальных, так и экспериментальных данных о функционировании системы. Следует помнить, что имеющиеся в распоряжении исследователя реальные данные о функционировании системы являются всего лишь выборкой из того, что могло произойти в прошлом.

Условия проведения машинных прогонов модели определяются на этапах стратегического и тактического планирования. Задача стратегического планирования заключается в разработке эффективного плана эксперимента, в результате которого либо выясняется взаимосвязь между управляемыми переменными, либо находится комбинация значений управляемых переменных, минимизирующая или максимизирующая отклик имитационной модели. В тактическом планировании в отличие от стратегического решается вопрос о том, как в рамках плана эксперимента провести каждый имитационный прогон, чтобы получать наибольшее количество информации из выходных данных. Важное место в тактическом планировании занимают определение начальных условий имитационных прогонов и методы снижения дисперсии среднего значения отклика модели.

Следующие этапы в процессе имитационного исследования — проведение машинного эксперимента и анализ результатов— включают прогон имитационной модели на компьютере и интерпретацию полученных выходных данных. При использовании результатов имитационных экспериментов для подготовки выводов или проверки гипотез о функционировании реальной системы применяются статистические методы.

Последним этапом в процессе имитационного исследования являются реализация полученных решений и документирование имитационной модели и ее использования. Ни один из имитационных проектов не должен считаться законченным до тех пор, пока их результаты не были использованы в процессе принятия решений.

Логика построения модели должна быть простой и понятной всем участникам имитационного исследования: в случае необходимости имитационная модель должна легко модифицироваться

Названные выше этапы имитационного исследования редко выполняются в строго заданной последовательности, начиная с определения проблемы и кончая документированием. В ходе имитационного исследования могут быть сбои в прогонах модели, ошибочные допущения, от которых в дальнейшем приходится отказываться, переформулировки целей исследования, повторные оценки и перестройки модели. Такой итеративный процесс позволяет разработать имитационную модель, которая дает верную оценку альтернатив и облегчает процесс принятия решения.

3. Пример: Имитационное моделирование работоспособности субмикронной структуры

3.1 Обеспечение надежности

Обеспечение качества и надежности — наиболее важный аспект современных изделий микро- и нанoeлектроники. Основная цель обеспечения надежности заключается в стремлении достигнуть максимального роста времени наработки на отказ, при сохранении или улучшении прочих характеристик приборов. Непрерывное масштабирование элементов СБИС значительно влияет на надежность, т.к. уменьшение линейных размеров вызывает рост плотностей тока, более высокие температуры кристалла и более высокие электрические поля в процессе работы прибора. Наиболее сильный рост при масштабировании имеет контактное сопротивление металлизации, увеличивая рассеиваемую мощность на контакте и активизируя диффузионные процессы на контакте. Проблема обеспечения надежности контактов в металлизации СБИС приобретает доминирующее значение.

Следует особо отметить роль и значение изучения физики надежности ИС. На стадии проектирования и конструирования оно включает в себя расширение объема знаний о свойствах, характеристиках, параметрах исходных материалов и конечных изделий, исследование закономерностей протекания физико-химических процессов, способных привести к отказам, предварительное физическое моделирование, т.е. создание надежностных эквивалентов ИС с помощью аналогов или специальных тестовых структур. Роль физического моделирования на этапе разработки ИС огромна, если учесть большие затраты на проектирование и изготовление и невозможность корректировки готовых ИС. Физический анализ нельзя оторвать от математического моделирования надежности ИС, перспективы которого связаны именно с использованием имитационных математических моделей. Имитационные математические модели должны учитывать не

только схемотехнические особенности, функциональную сложность ИС, но и влияние окружающих условий, нагрузок, методов пассивации, степени интеграции, отработанности конструкции, качества исходного сырья. Физическое и математическое моделирование на этапе разработки ИС позволяет произвести всесторонний анализ отказов, рассчитать надежность элементов, схем, систем по основным видам отказов, осуществить научное прогнозирование надежности на основе обобщения предыдущего опыта эксплуатации и испытаний, а также с помощью физико-химических закономерностей протекания предполагаемых процессов деградации ИС.

К этому следует добавить, что при создании надежных моделей исследователи «расчленяют» ИС на элементы. В полупроводниковых ИС функциональная самостоятельность элементов зачастую не совпадает с технологической из-за сильных корреляционных связей, возникающих в процессе изготовления элементов в едином технологическом цикле. Поэтому, рассматривая проблему надежности полупроводниковых ИС, часто выделяют «компоненты ненадежности» по таким технологическим признакам, как независимость при изготовлении и возможность получения с помощью определенного набора замкнутых технологических операций [4]. Такими компонентами могут быть: монокристаллическая пластина, поверхностный окисел, легированные области, металлизация, контакты, выводы, корпус.

Уменьшение масштабов воздействует на надежность, потому что уменьшение линейных размеров вызывает рост плотностей тока, более высокие температуры кристалла, и более высокие электрические поля в процессе работы прибора. Наиболее сильный рост при масштабировании имеет контактное сопротивление металлизации, увеличивая рассеиваемую мощность на контакте $(1/\sqrt{K}-1/K)^2$ и активизируя диффузионные процессы на нем [5]. Характеристики ИС могут быть легко ограничены ростом RC-задержки и потребляемой энергией.

Контактные системы на основе контактов металл-полупроводник (КМП) нашли широкое применение в полупроводниковых приборах (ПП) и интегральных схемах (ИС). В микроэлектронике КМП выполняют функции межсоединений, выпрямляющих контактов (с потенциальным барьером) и невыпрямляющих (омических) контактов.

Анализ применения КМП показал, что при дальнейшем повышении степени интеграции обостряется проблема обеспечения надежности КМП. Это определяется следующими факторами. Характеристики КМП зависят от свойств границы раздела двух, сильно различающихся веществ (металла и полупроводника), на которой возможны физико-химические процессы (взаимная диффузия, твердофазные реакции, твердофазная эпитаксия), приводящие к значительным изменениям характеристик КМП. На границу

раздела может влиять внешняя среда (материал) через тонкие и недостаточно совершенные металлические слои, значительно изменяя свойства КМП.

3.2 Физическое моделирование отказов и прогнозирование работоспособности

Развитие и совершенствование технологии ИС вызывает неизбежную эволюцию методов изучения их надежности: от статистических методов — к физическим, от исследования интенсивности отказов — к классификации отказов по видам и от нее — к созданию моделей механизмов отказов ИС. Для первого, собирательного, периода развития физики надежности характерно накопление сведений о возможных дефектах ИС и создание классификации отказов по видам. Базой для классификации служит различие в характере наблюдаемых дефектов. Качественное исследование вышедших из строя ИС, от визуального изучения макродефектов до современных методов физико-химического анализа отказов, ставит своей целью выявление наиболее характерных причин ненадежности и обеспечение соответствующих мер их устранения.

В связи с возросшими возможностями технологии ИС, появлением УБИС, возникает необходимость создания нового метода для преодоления возникшей диспропорции между тенденцией к дальнейшему повышению надежности ИС и консерватизмом способов ее оценки. В поисках новых способов исследователи, используя положительный опыт статистического метода заключающийся, в частности, в применении вероятностного математического моделирования, создают физическое направление изучения надежности ИС. Основная роль в нем принадлежит физическому моделированию отказов и количественному прогнозированию надежности ИС на основе данных о свойствах материалов и происходящих в них процессах [4]. При этом разрабатываемый в настоящее время математический аппарат физической теории надежности не только не исключает, но и предполагает использование вероятностных методов, поскольку физические характеристики объектов представляют собой обычные случайные (или случайно-детерминированные) функции времени или случайные величины. Существует убеждение в том, что единственно верное направление дальнейшего развития теории и техники надежности — это сочетание статистических, вероятностных методов с глубоким проникновением в физическую (или физико-химическую) сущность процессов, протекающих в изделии.

Физическое моделирование надежности ИС включает в себя теоретический и экспериментальный этап. Первоочередной задачей является определение наиболее существенных источников, порождающих отказы. Это легче всего осуществить в тех случаях, когда в ИС существуют явные причинные механизмы отказов или наблюдаются

деградационные процессы, ведущие к ухудшению электрических параметров. В ходе теоретической разработки физической модели надежности ИС получают комплекс математических выражений, управляющих идеализированными физическими процессами деградации и причинными механизмами отказов. Модель может достаточно точно описывать реально происходящие явления и отражать связь изменений электрических характеристик ИС с атомными и молекулярными процессами. Сущность физического прогнозирования надежности ИС заключается в отыскании корреляционной зависимости между распределением времени безотказной работы и происходящими в материале ИС физико-химическими процессами. Наиболее точный прогноз работоспособности и долговечности ИС может быть осуществлен в том случае, если получена количественная модель надежности, отражающая функциональную зависимость основных причинных и деградационных механизмов отказов от времени, температуры, электрической нагрузки и других эксплуатационных факторов, а также особенности взаимодействия этих механизмов в рамках данного устройства. Такая модель базируется на изучении поведения ИС не только в момент отказа, но и в ходе изменения параметров схемы, т. е. на исследовании кинетики отказов. Решение этой задачи облегчается с помощью физического эксперимента заключающегося в моделировании наиболее типичных условий возникновения причинных механизмов отказов и процессов физико-химической деградации параметров ИС.

Если создание количественных моделей механизмов отказов не всегда возможно, то получение качественных представлений о физике отказов совершенно необходимо. Во всех случаях, когда трудно установить явный причинный механизм отказа или деградационный процесс, а надежность ИС в большей мере оказывается зависящей от наличия производственных дефектов, возрастает роль качественного анализа отказов.

Таким образом, в настоящее время сосуществуют два взаимно дополняющих друг друга направления физики надежности ИС: количественное (физическое моделирование и причинное прогнозирование надежности) и качественное (физико-химический анализ отказавших ИС с помощью современных экспериментальных методов).

Высокая надежность приборов, изготавливаемых по интегральной технологии, обусловила несколько проблем, связанных с методом оценки надежности.

Первая из проблем заключается в том, что обычные методы определения надежности становятся все менее приемлемыми по мере снижения интенсивности отказов приборов высокой степени интеграции. Если проводить испытания надежности в нормальных условиях, то даже при значительном числе испытуемых, микросхем потребовалось бы несколько лет. Так как практически это неприемлемо одним из путей

решения данной проблемы является проведение испытаний при нагрузках, значительно превышающих номинальные. При этом выбор нагрузок должен быть таким, чтобы механизм отказов соответствовал отказам, возникающим в нормальном рабочем режиме.

Вторая проблема, возникающая при оценке надежности приборов, изготавливаемых по интегральной технологии, связана с быстрыми изменениями и усовершенствованиями технологических процессов производства. Обычно это обусловлено необходимостью улучшения параметров интегральных приборов, повышения процента выхода годных микросхем, замены, материалов и др. Поэтому могут возникать новые механизмы отказов, а, следовательно, и необходимость новой оценки надежности. Основным путем решения этой проблемы является разработка ускоренных методов оценки надежности интегральных приборов.

К другим проблемам оценки надежности следует отнести сравнительно высокую стоимость испытаний, так как при оценке надежности приборов, изготавливаемых по интегральной технологии, в целом для большей достоверности требуется испытывать большее число приборов. Выбор критериев отказов интегральных приборов осложняется тем, что сравнительно сложный прибор характеризуется десятками параметров. Кроме того, рабочие характеристики приборов, изготавливаемых по интегральной технологии, меняются в зависимости от применения и могут привести к отказу. Одним из путей решения этой проблемы является выбор основных параметров, которые могут характеризовать в определенной степени надежность интегральной схемы в целом.

Еще необходимо учитывать малые размеры отдельных элементов интегральной схемы, что затрудняет контроль и прогнозирование их надежности, определение их влияния время работы до отказа поставленных на испытание интегральных приборов, будет различным. Это объясняется тем, что при изготовлении интегральных приборов очень тяжело выдержать технологический режим и строгую однородность физико-химическую структуру применяемых материалов.

При прогнозировании надежности элементов СБИС на стадии их проектирования имеется наибольшая неопределенность в оценке возможных состояний будущей системы. Методический подход для решения этой задачи заключается в использовании в качестве основы для оценки вероятности безотказной работы соответствующих моделей механизмов, приводящих к отказам.

Создание средства прогнозирования надежности контактных структур требует решения комплекса задач:

- определение структурного, фазового и дефектного состава;
- определение кинетики взаимодействий в контактах, приводящих к

деградации структуры;

- определение влияния процессов деградации на электрические свойства контактов;
- определение начальных параметров контакта как функции параметров технологического процесса;
- установление предельно допустимых значений выходных параметров;
- оценка спектров режимов работы, которые отражают возможные условия работы и определяют рассеивание скоростей изменения выходных параметров;
- создание адекватной математической модели отказа контактных структур.

3.3 Механизмы возникновения отказов в контактных структурах

Сформированная в технологическом цикле дефектная структура контакта не является равновесной. В пленках возможно протекание ускоренной диффузии примесей по границам зерен. При малых размерах зерен плотность границ увеличивается, и скорость диффузии возрастает [6].

Анализ полученных экспериментальных данных и литературных источников показал, что при формировании субмикронных контактных слоев к мелкозалегающим р-п-переходам необходимо учитывать возникновение отказов из-за 7-ми основных механизмов:

1. поток точечных дефектов вглубь подложки в процессе формирования контакта — ускоренная диффузия примесей по этим дефектам;
2. латеральный рост силицида и закорачивание областей
3. избыточное потребление кремния из подложки при формировании контактного слоя и разрушение активной области под контактом;
4. проколы р-п-переходов из-за взаимной диффузии кремния подложки и контактной пленки и возникновение утечек в переходах;
5. попадание межзеренных границ в область контакта малой ширины;
6. скопление примесей и загрязнений на границе раздела пленка/подложка;
7. ускоренная диффузия примесей по границам зерен металлизации.

Общей причиной возникновения перечисленных механизмов деградации является гетерогенная природа контактных систем, состоящих из нескольких фаз, разделенных промежуточными областями, имеющих различную физико-химическую природу: монокристаллическая подложка Si с развитой дефектной структурой и поликристаллическая пленка, связанная аморфными химически активными границами зерен и фаз. Возникновение движущей силы процессов при формировании или деградации контактной системы обусловлено следующими составляющими:

- диффузионная составляющая движущей силы (наличие градиента концентрации);
- химическая составляющая (наличие внутренней химической энергии);
- электрическая составляющая (наличие внешнего электрического воздействия при приложении электрического поля);
- механическая составляющая (наличие внешних и внутренних механических напряжений).

Таким образом, указанные выше механизмы отказов можно описать общим подходом, описывающим процесс массопереноса и химической реакции под действием диффузионных, химических, электрических и механических сил.

3.4 Имитационное моделирование отказов полупроводниковых приборов с субмикронными контактными структурами.

Для сокращения материальные и временные затраты на экспериментальную оценку надежности элемента СБИС разработчику необходимо средство оценки и прогнозирования надежности, которое являлось бы дополнительным фактором в принятии конструкторско-технологических решений, уменьшало бы количество путей дальнейшей разработки, и было бы совместимым с существующими САПР. Таким средством может служить имитационное моделирование (ИМ) отказов в контактных структурах, основанное на моделировании физических процессов приводящих к отказам.

В данном параграфе будут рассмотрены общие вопросы ИМ контактных структур и применение методов статистических испытаний (Монте-Карло метод) и конечных элементов (МКЭ).

Имитационная модель надежности представляет собой численный метод проведения на ЭВМ экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение контактных структур в течение заданного или формулируемого периода времени. Поведение компонент и их взаимодействие в ИМ описывается набором алгоритмов, реализуемых на некотором языке моделирования. Все эти описания представляют собой программную ИМ, которую необходимо вначале отладить и испытать, а затем использовать для постановки ИЭ на ЭВМ. Поэтому под процессом имитации на ЭВМ будем понимать конструирование модели для изучения данной проблемы.

Для моделирования надежности можно выделить следующие этапы создания и использования математических моделей:

- определение объекта имитации, установление границ и ограничений моделирования, выбор показателей для сравнения эффективности вариантов системы

(составление содержательного описания объекта моделирования);

- формулировка замысла модели, переход от реальной системы к логической схеме ее функционирования (составление концептуальной модели);
- реализация описания объекта в терминах математических понятий и алгоритмизация функционирования ее компонент (составление формального описания объекта);
- преобразование формального описания объекта в описание имитационной модели (составление описания имитационной модели);
- программирование и отладка модели (программирование модели);
- проверка модели, оценка ее свойств и затрат ресурсов на имитацию (испытание и исследование модели);
- организация модельного эксперимента на ЭВМ (эксплуатация модели);
- интерпретация результатов моделирования и их использование в ходе проектирования разработка рекомендаций по обеспечению требуемого уровня надежности высоконадежных интегральных приборов (анализ результатов).

Предварительный анализ природы и причин отказов проводится с целью выбора наиболее эффективных методов построения моделей отказов и наиболее информативных планов испытаний, а также для определения количественных показателей надежности. При разработке моделей отказов приборов, изготавливаемых по интегральной технологии, исходят из того, что основной вклад в их надежность вносят физические и физико-химические деграционные процессы, влияющие на структуру материалов.

Формулировка конкретных задач исследования с помощью имитационных надежностьных систем определяет объем и характер предварительных натуральных экспериментов, а также объем испытаний на ЭВМ и характер внешнего и внутреннего математического обеспечения.

Методы построения моделей деграции высоконадежных изделий могут быть различными. Для интегральных приборов наиболее подходит эмпирическое моделирование, позволяющее оценивать количественные показатели надежности изделия в целом, без разделения его на элементарные составляющие.

Разработка математического обеспечения для имитационных надежностьных систем должна предусматривать оптимальность алгоритмов и программ для ЭВМ, создание специальных программ, формирование банка массива исходных данных, обеспечение ЭВМ библиотекой стандартных рабочих программ и др.

Адекватность составленной имитационной модели деграции подтверждается проведением дополнительных научных экспериментов, адекватность эмпирических

моделей деградации - построением прогнозирующих функций случайных процессов и их анализом.

На рис.2 представлена схема взаимосвязи технологических этапов моделирования надежности.

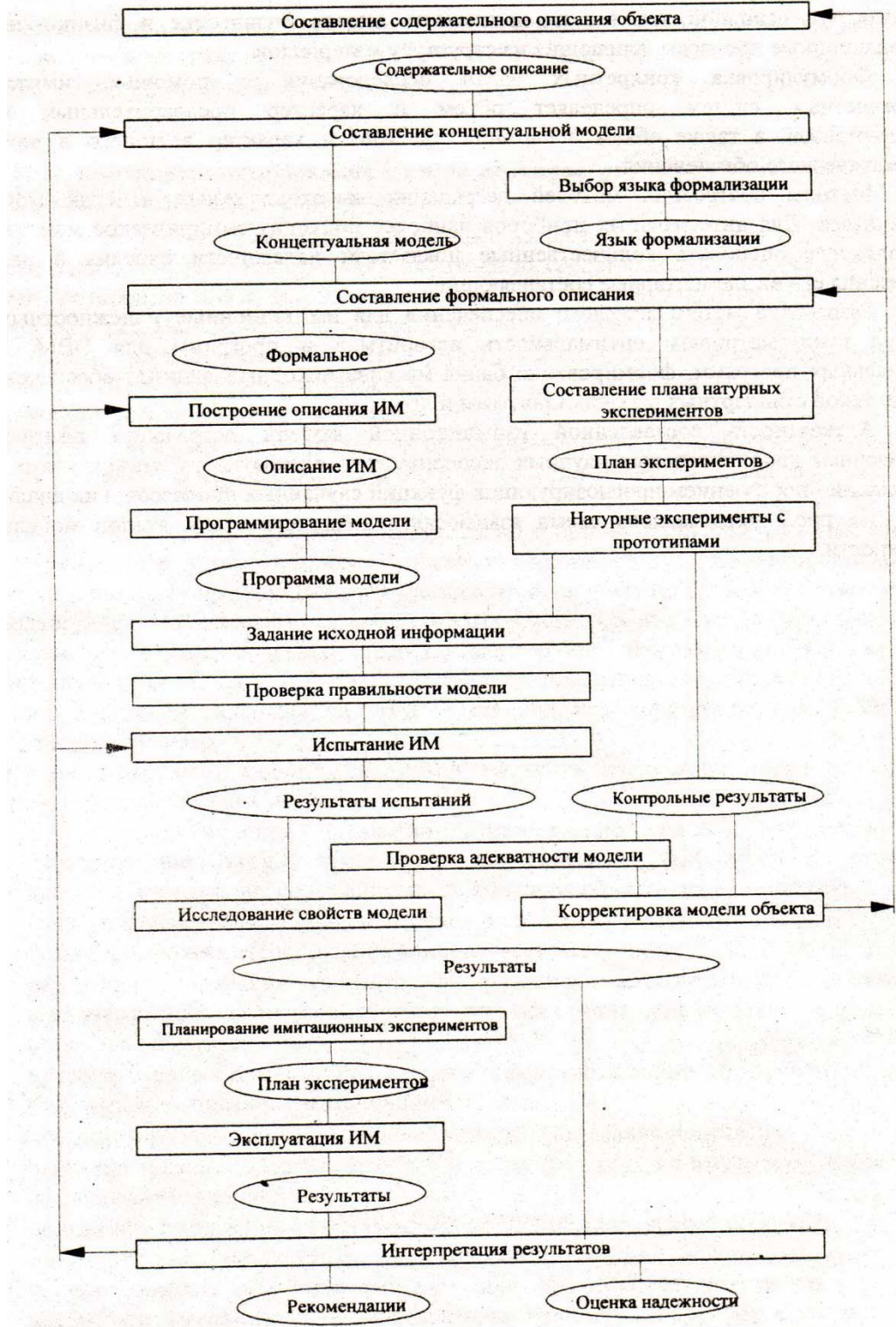


Рис. 2. Схема взаимосвязи этапов создания и реализации имитационной модели надежности

3.4.1 Постановка задачи

Объект: Контактные структуры проводник-полупроводник применяемые для субмикронных и микронных технологий микроэлектроники.

Цель:

- 1) Изучение влияния технологических параметров на надежность объекта.
- 2) Изучение влияния внешней среды на надежность объекта.
- 3) Изучение влияния эксплуатационных параметров на надежность объекта.
- 4) Изучение процессов деградации, старения и отказов в объекте.

Показатель качества:

Время наработки на отказ $t_{отк}$.

Управляющие переменные:

- 1) Технологические параметры.
- 2) Внешние дестабилизирующие воздействия (температурные, механические).
- 3) Входные эксплуатационные параметры.
- 4) Геометрические характеристики.
- 5) Характеристики материалов.

Первичная декомпозиция системы:

- 1) Моделирование технологических процессов.
- 2) Моделирование отказов объектов.

3.4.2 Концептуальная модель.

На рис. 3. представлена концептуальная модель объекта. Она содержит модель технологических процессов (МТП), модель физической структуры (МФС), модель функционирования (МФ), модель деградации (МД), блок статистического анализа (СА). Управляющими параметрами для модели технологических процессов являются параметры техпроцесса, а для модели функционирования и модели деградации - внешние дестабилизирующие факторы и входные эксплуатационные параметры. Критический параметр работоспособности объекта сравнивается с критерий отказа и определяет отказ.

Основным математическим методом, используемым в модели, является метод статистических испытаний (Монте-Карло метод).

Выбор Монте-Карло метода определяется следующими достоинствами:

- нет ограничений на рассеяние входных параметров;
- имеется возможность восстановления плотности распределения;
- имеется возможность вычислять оценки числовых характеристик случайных

величин с большой точностью, так как число экспериментов N наращивается за счет увеличения машинного времени.

Для реализации метода статистических испытаний необходимо:

1. определить рассеяние параметров;
2. иметь математическую модель процессов функционирования и деградации.

Машинная реализация системы прогнозирования отказов в контактных структурах будет построена на основании приведенной модели.

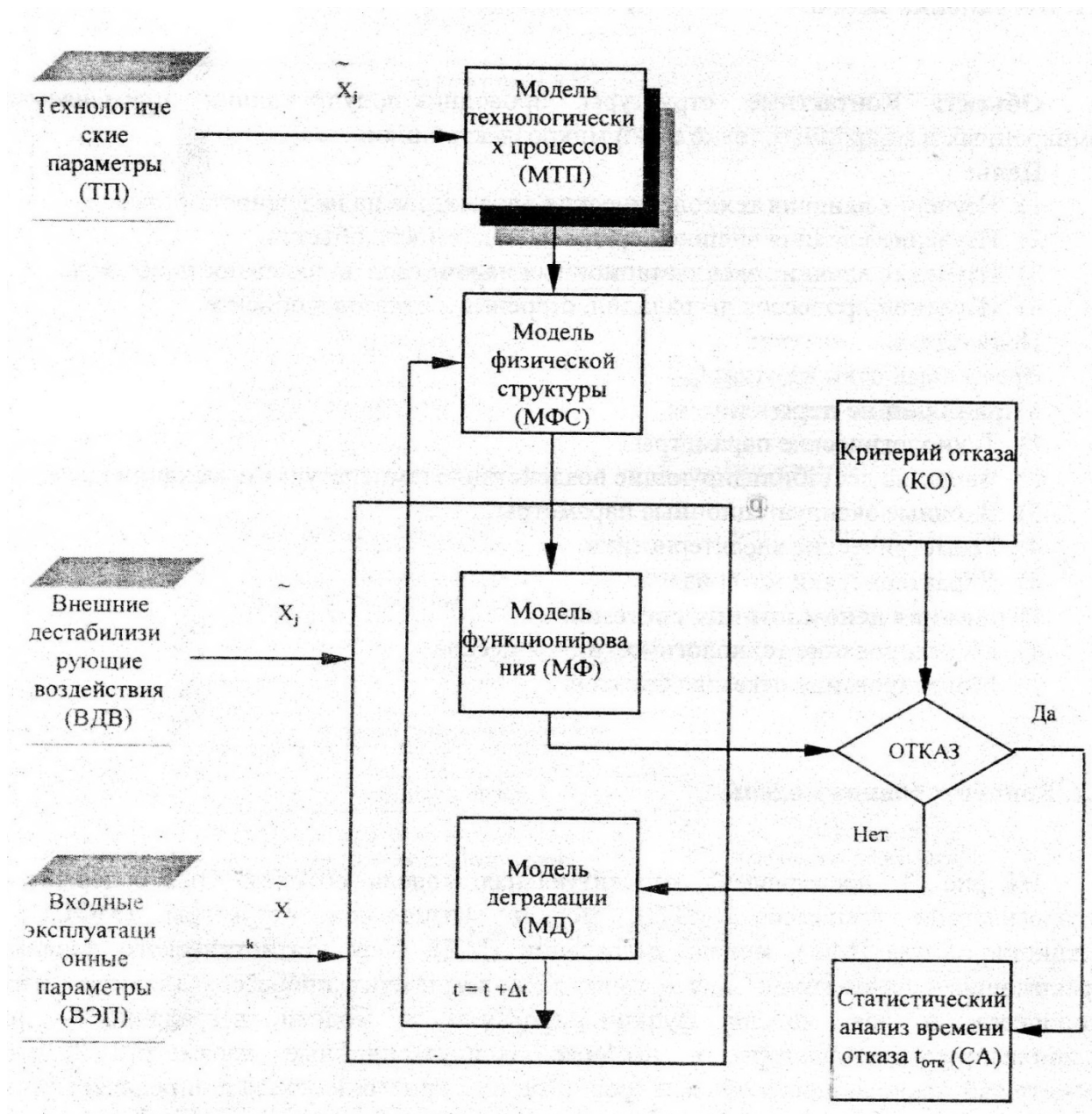


Рис. 3. Концептуальная модель отказа контактных структур

3.4.3. Использование метода конечных элементов для моделирования отказа.

Для моделирования процессов функционирования и деградации необходимо решить задачи переноса электрического заряда и переноса материала в неоднородном пространстве под воздействием электрических, тепловых и механических нагрузок.

Все эти процессы описываются законами математической физики в частных производных:

- Уравнениями Максвелла (для электромагнитных полей);
- Уравнениями Фика (для диффузии);
- Законами механики твердого тела.

Объединенное решение этих уравнений позволит моделировать надежность интегрального элемента. Однако решить эти уравнения для произвольного пространства аналитическими методами не представляется возможным: необходимо применение приближенных методов решения.

Общность решаемых уравнений (в частных производных) и простота матричных формулировок позволили предложить метод сеток и его разновидность — метод конечных элементов — для составления имитационной математической модели.

Сущность метода сеток состоит в аппроксимации искомой непрерывной функции совокупностью приближенных значений, рассчитанных в некоторых точках области — узлах. Совокупность узлов, соединенных определенным образом, образует сетку. Сетка, в свою очередь, является дискретной моделью области определения искомой функции.

Применение метода сеток позволяет свести дифференциальную краевую задачу к системе нелинейных в общем случае алгебраических уравнений относительно неизвестных узловых значений функций.

В общем случае алгоритм метода сеток состоит из трех этапов.

Этап 1. Построение сетки в заданной области (дискретизация задачи).

Этап 2. Получение системы алгебраических уравнений относительно узловых значений (алгебраизация задачи).

Этап 3. Решение полученной системы алгебраических уравнений.

В методе конечных элементов исходная область определения функции разбивается с помощью сетки, в общем случае неравномерной, на отдельные подобласти — конечные элементы. Искомая непрерывная функция аппроксимируется кусочно-непрерывной, определенной на множестве конечных элементов. Аппроксимация может задаваться произвольным образом, но чаще всего для этих целей используются полиномы, которые подбираются так, чтобы обеспечить непрерывность искомой функции в узлах на границах элементов.

Для трехмерных областей наиболее употребимы элементы в форме тетраэдра и параллелепипеда, которые также могут иметь прямолинейные и криволинейные границы.

В общем случае алгоритм МКЭ состоит из четырех этапов.

Этап 1. Выделение конечных элементов (разбиение заданной области на конечные элементы).

Этап 2. Определение аппроксимирующей функции для каждого элемента

(определение функции элемента). На данном этапе значение непрерывной функции $\varphi(e)$ в произвольной точке его конечного элемента аппроксимируется полиномом

$$\varphi(e) = A(e)R + A_0, \quad (1)$$

где $A(e)$ — вектор-строка коэффициентов полинома; A_0 — свободный член; $R = (x, y, z)$ — вектор координат в рассматриваемой точке.

Задача этапа далее заключается в определении неизвестного вектора $A(e)$ и свободного члена A_0 . Для этого, используя условие непрерывности функции в узлах, коэффициенты полинома выражают через вектор $\Phi(e)$ узловых значений функции и координаты узлов i , проделав эквивалентные преобразования, получают

$$\varphi(e) = N(e)\Phi(e), \quad (2)$$

где $N(e)$ — матрица-строка, элементы которой называют функциями формы конечного элемента.

Функции формы легко вычисляются в каждой точке конечного элемента через координаты самой точки и координаты узлов элемента.

Этап 3. Объединение конечных элементов в ансамбль. На этом этапе уравнения (5.2), относящиеся к отдельным элементам, объединяются в ансамбль, т.е. в систему алгебраических уравнений:

$$\varphi = N\Phi. \quad (3)$$

Система (3) является моделью искомой непрерывной функции.

Этап 4. Определение вектора узловых значений функции. В общем случае вектор Φ вначале неизвестен. Его определение — наиболее сложная процедура в МКЭ.

На Рис. 4. представлена декомпозиция концептуальной модели отказа на базе метода конечных элементов.

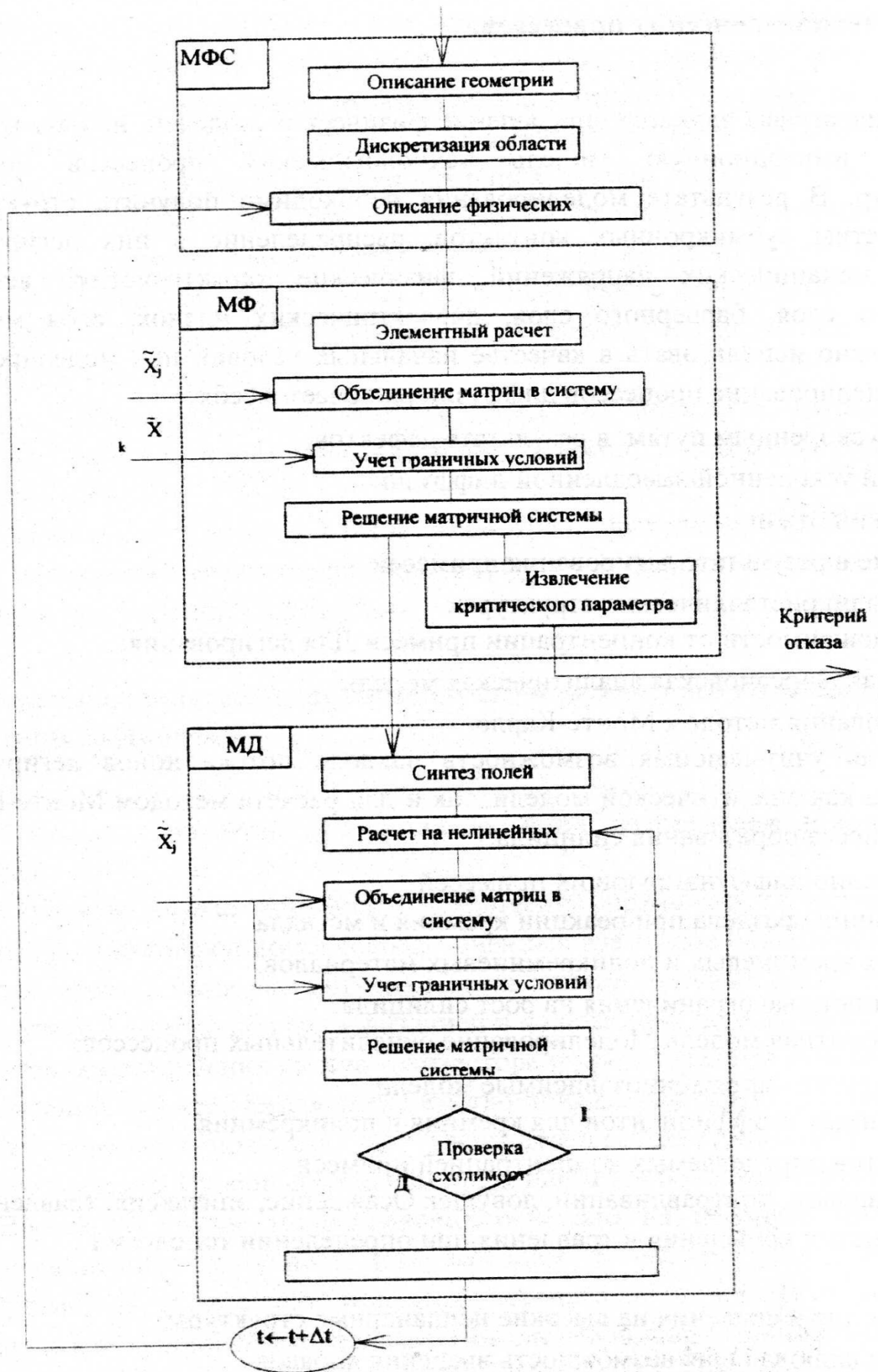


Рис. 4. Декомпозиция модели на базе метода конечных элементов

3.4.4 Моделирование технологических процессов.

Целью данного параграфа является определение физических моделей, на базе которых возможно составить имитационную модель технологических процессов создания субмикронных структур. В результате моделирования необходимо получить структуру и геометрические параметры субмикронных контактов, распределение в них легирующих примесей, дефектов, механических напряжений, физические характеристики вещества подложки, переходного слоя, барьерного слоя, диэлектрических пленок, слоя металла, полученные данные можно использовать в качестве начальных условий при моделировании отказов в контакте. Моделирование процессов диффузии включает в себя:

- Модель диффузии по ускоренным путям, в результате дефектов
- Модель окислительной ускоренной/замедленной диффузии
- Скоростной термический отжиг
- Эффекты, возникающие в результате легирования примесей
- Модель диффузии в поликристаллических структурах
- Модель диффузии, в зависимости от концентрации примеси для легирования:
- Пирсановская и двойная Пирсановская аналитическая модель
- Моделирование легирования методом Монте-Карло
- Универсальная модель, учитывающая возможность наклона потока ионов легирующей примеси (применима как аналитической модели, так и для расчета методом Монте-Карло)

Моделирование процесса образования силицида:

- Вычисление одновременно диффундирующих примесей
- Модель изменения границы раздела при реакции кремния и металла
- Независимая норма для кремниевых и поликремниевых материалов.
- Диффузионные и реакционные ограничения на рост силицида.
- Точная материально затратная модель
- Моделирование окислительных процессов:
- Сжимающие и вязкоупругие напряжённозависимые модели
- Разделение нормированных коэффициентов для кремния и поликремния
- Моделирование эффектов определяемых концентрацией примеси
- Модель образования канавок, подтравливаний, ловушек, осаждение, эпитаксия, травление:
- Определение характеристик напыления и травления при определении топологии фотошаблона

- Специальный алгоритм для напыления на высокие непланарные структуры
- 2-х мерная эпитаксия включающая возможность введения добавок

3.4.5 Моделирование механических напряжений в контактном соединении

Механические напряжения в КМП обусловлены следующими причинами.

Во-первых, внутренними механическими напряжениями в пластине полупроводника, в пленках металла и защитного (разделительного) диэлектрика

Во-вторых, различием в параметрах кристаллических решеток металла, защитного (разделительного) диэлектрика и полупроводника. В-третьих, разницей в коэффициентах линейного термического расширения и модуля упругости металла, диэлектрика и полупроводника. В-четвёртых, возникновение упругих напряжений связано с отличием размеров атомом диффундирующего вещества от размеров атомов полупроводника или металла. Если концентрация диффундирующих атомов невелика (плохая растворимость), в диффузионных слоях наблюдается лишь неоднородная деформация кристаллической решетки. При высокой концентрации примеси, когда напряжение, вызванное примесями, превышает предел упругости материала, может иметь место пластическая деформация с образованием дислокации в диффузионных слоях. В результате диффузии возникает механическое напряжение.

Для субмикронных контактных структур, процессы деградации электрических параметров, вызванные механическими напряжениями, в основном определяются вторым и четвёртыми пунктами.

В качестве примера нами была рассмотрена программа "FLOOPS" для моделирования упругих напряжений возникающих при диффузии фосфора в кремнии и модель образования дислокации при упругих напряжениях.

3.4.6 Моделирование распределение электростатического потенциала и токов в контактном соединении

Возможны два пути при моделировании распределения токов и электрического потенциала.

В первом случае контактное соединение возможно представить в виде системы состоящей в виде совокупности сосредоточенных элементов (моделирование на макроуровне), в качестве образца была рассмотрена модель тонкоплёночных МОП транзисторов на основе КПД структур с контактной металлизацией в виде силицидных плёнок. Данная модель служит для расчёта сопротивления канала транзистора и представляет собой совокупность омических сопротивлений. Электрическая схема жестко привязана к структуре контакта, модели данного типа не позволяют получить вид распределения электрического поля при изменении структуре контакта. Второй способ

нам представляется более универсальным.

Во втором случае моделирование основано на решении многомерных уравнений, методом конечных элементов или методом конечных разностей (моделирование на микроуровне). В этом случае процессы переноса электрического заряда и распределения потенциала в полупроводнике описываются системой дифференциальных уравнений.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi + ((q/\epsilon) \cdot (p - n + N_D + N_A + N_Q)) &= 0 \\ J_n &= q \cdot \{ (D_n \cdot \nabla n - \mu_n \cdot n \cdot \nabla (\psi + \Delta V_c)) \} \\ J_p &= q \cdot \{ (D_p \cdot \nabla p - \mu_p \cdot p \cdot \nabla (\psi + \Delta V_v)) \} \\ \nabla J_n - q \cdot (\partial n / \partial t + R_n) &= 0 \\ \nabla J_p + q \cdot (\partial p / \partial t + R_p) &= 0 \end{aligned}$$

Необходимо заметить, что данные уравнения не учитывают эффекты, возникающие в вырожденных полупроводниках, не описаны явления насыщения скорости и не учтены ни какие эффекты, обусловленные баллистическим переносом.

При моделировании силицидного контакта задача облегчается тем, что для получения достаточно точных результатов можно ограничиться распределением заряда только одного типа.

3.4.7 Моделирование диффузионных процессов в объёме контакта.

Распределение и перенос вещества в объёме математически можно описать с помощью двух законов Фика.

В связи с тем, что большинство материалов в контактах (поликремний, силицид, Al, W) имеют поликристаллическую структуру, возникли затруднения в определении коэффициента диффузии. Нами была промоделирована диффузионные процессы для монокристаллического кремния, что позволяет нам не учитывать диффузию по границам зерен. Данная задача свелась к решению уравнений переноса вещества в тепловом поле. Вычисления концентрации примеси проводилось по следующей формуле (второму закону Фика):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla [D \cdot \nabla N]$$

Рассмотрен метод конечных элементов для решения задачи переноса вещества в контактных структурах. Метод заключается в разбиении исследуемой области на большое, но конечное число элементов, которые связаны между собой в узловых точках. Метод позволяет перейти от дифференциальной формулировки задачи к удобной для программирования матричной интегральной формулировке для узловых точек. Разбиение структуры производится таким образом, чтобы с необходимой точностью предположить однородность и изотропность свойств внутри конечного элемента. Каждый элемент обладает индивидуальными свойствами, что позволяет определять коэффициент

диффузии в зерне и, при необходимости, на границах зёрен отдельно, так же моделировать различные дефекты и аномалии структуры.

Получаемое решение является приближенным решением задачи, точность которого определяется количеством конечных элементов.

Важным преимуществом метода является то, что и задачи переноса заряда, и задачи переноса вещества описываются в дифференциальных уравнениях второго порядка, и возможно решать их на одной сетке конечных элементов.

На основе полученной имитационной модели была разработана программа FPS (Failure Prediction System for silicide-contact structures) может быть использована для изучения отказов в силицидных контактных структурах в зависимости от технологических параметров их изготовления и условий эксплуатации. Для расчета должны быть введены следующие входные данные:

- материал полупроводника;
- материал проводника;
- донорная примесь;
- критерий отказа;
- допустимое отклонение критерия (%);
- ширина исследуемой подзатворной области: d (мкм);
- размер контактного окна: $2a$ (мкм);
- максимальная концентрация донорной примеси: N_d ($1/\text{см}^3$);
- максимальная концентрация акцепторной примеси: N_a ($1/\text{см}^3$);
- энергия ионов донорной примеси: E (эВ);
- температура отжига: $T_{\text{отж}}$ ($^{\circ}\text{C}$);
- продолжительность отжига: $t_{\text{отж}}$ (мин);
- рабочая температура контакта: $t_{\text{раб}}$ ($^{\circ}\text{C}$);
- рабочий диапазон напряжений: $U_{\text{min}} \dots U_{\text{max}}$ (В);
- время эксперимента: $t_{\text{эсп}}$ (час);
- вид конечного элемента;
- количество конечных элементов по горизонтали и по вертикали;
- количество контрольных точек для расчета диффузии в процессе отжига и на протяжении эксперимента;
- количество контрольных точек для расчета ВАХ контакта.

Результатом расчета являются:

- разбиение исследуемой области на конечные элементы;

- точность вычислений и геометрического описания объекта;
- оптимальная длина и ширина исследуемой области;
- шаг конечноэлементной сетки;
- параметры ионного легирования (доза имплантации $Q: 1/\text{см}^2$) и их вероятностные характеристики;
- графики распределения концентрации донорной примеси после изготовления контакта и после завершения эксперимента;
- графики ВАХ контакта после его изготовления и после завершения эксперимента;
- значения средней концентрации донорной примеси после изготовления контакта и после завершения эксперимента;
- значения критического параметра после изготовления контакта и после завершения эксперимента;
- максимальное отклонение критического параметра;
- результаты анализа работы контакта (выводы).

3.4.8 Определение надёжных показателей системы при помощи машинного моделирования.

В результате машинных испытаний предполагается моделирование деградационных процессов для того, чтобы установить связь между исходными параметрами (внешние дестабилизирующие воздействия - ВДВ), и надёжными показателями системы (в нашем случае временем отказа).

Для решения задач прогнозирования поведения СС на ЭВМ, предоставляется возможным применения метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Выбор Монте-Карло метода определяется следующими достоинствами:

- нет ограничений на рассеяние входных параметров;
- имеется возможность восстановления плотности распределения;
- имеется возможность вычислять оценки числовых характеристик случайных величин с большой точностью, так как число экспериментов N наращивается за счёт увеличения машинного времени. Для реализации метода статистических испытаний необходимо:

1. определить рассеяние параметров;
2. иметь математическую модель процессов функционирования и деградации, задачи.

Задавая случайным образом, в соответствии с законом их распределения,

показатели внешних дестабилизирующих воздействий, физические, морфологические характеристики контакта, возможно получить степень их влияния на надежность системы и плотность распределения отказов.

3.4.9 Структура программы-имитатора отказа и внутреннее представление данных

Наибольшее влияние на свойства силицидных контактных структур (с точки зрения их деградации) оказывают диффузионные (электромиграционные) процессы. Поэтому, используемая модель функционирования контакта описывает протекание диффузии в зависимости от условий его изготовления и эксплуатации. В качестве критерия отказа рассматривается степень деградации ВАХ.

Расчет с помощью предложенной имитационной модели включает четыре основных этапа:

- моделирование процесса ионной имплантации;
- моделирование диффузионных процессов при отжиге;
- моделирование диффузионных процессов при работе контакта;
- расчет ВАХ контакта проводник-полупроводник.

Первые два этапа рассчитываются один раз, поскольку они описывают стадию изготовления электронных приборов, включающих субмикронные контакты. На следующем этапе моделируется процесс деградации контакта при эксплуатации прибора. Задача является квазистационарной относительно времени, прошедшего с момента выпуска изделия [1], и рассчитывается на фиксированных временных интервалах до тех пор, пока не наступит отказ системы. Поскольку в качестве критерия отказа выбрана степень деградации ВАХ, четвертый этап расчетов также необходимо выполнять неоднократно для проверки работоспособности контакта на текущем временном интервале.

Для создания системы прогнозирования отказов в контактных структурах в качестве базового был выбран язык программирования высокого уровня C++. Одним из его достоинств является возможность написания объектно-ориентированных программ. Объектная ориентация в данном случае позволяет описывать физические характеристики и поведение объекта исследования как совокупность составляющих, промоделированных на микроуровне.

Структурное описание объектов при моделировании отказов в силицидных контактах представлено на рис. 5. Базовый объект находится в вершине графа. Стрелками показано наследование объектов.

Согласно принципам наследования, каждый «объект-наследник» включает в себя

всю информацию «объекта-родителя» (принцип инкапсуляции) и способен изменять ее благодаря виртуализации свойств (полиморфизму) [7].

Как следует из приведенного структурного описания, все объекты характеризуется:

- а) названием;
- б) набором параметров;
- в) способом изменения (преобразования) своих и наследуемых параметров;
- г) очередностью преобразований.

Таким образом, самый нижний объект представляет собой общую модель создания и функционирования силицидной контактной структуры. Он включает в себя полный набор характеристик контакта, технологических параметров его изготовления и условий эксплуатации, а также совокупность моделей, описывающих деградацию структуры на всех этапах ее существования.

Подобный подход дает возможность добавлять любое количество параметров, характеризующих контакт, а также новые виды воздействий, изменяющие его свойства (т.е. уточнять детали техпроцесса и дестабилизирующие факторы при эксплуатации).

Приведенные в настоящем параграфе теоретические обоснование показывает поэтапную реализацию имитационной математической модели формирования постепенного отказа в контактных структурах СБИС.

Совместное применение традиционных средств обеспечения надежности и предлагаемой имитационной модели позволит сократить материальные и временные затраты на экспериментальную оценку надежности создаваемого прибора, а также повысит качество конструкторско-технологических решений.

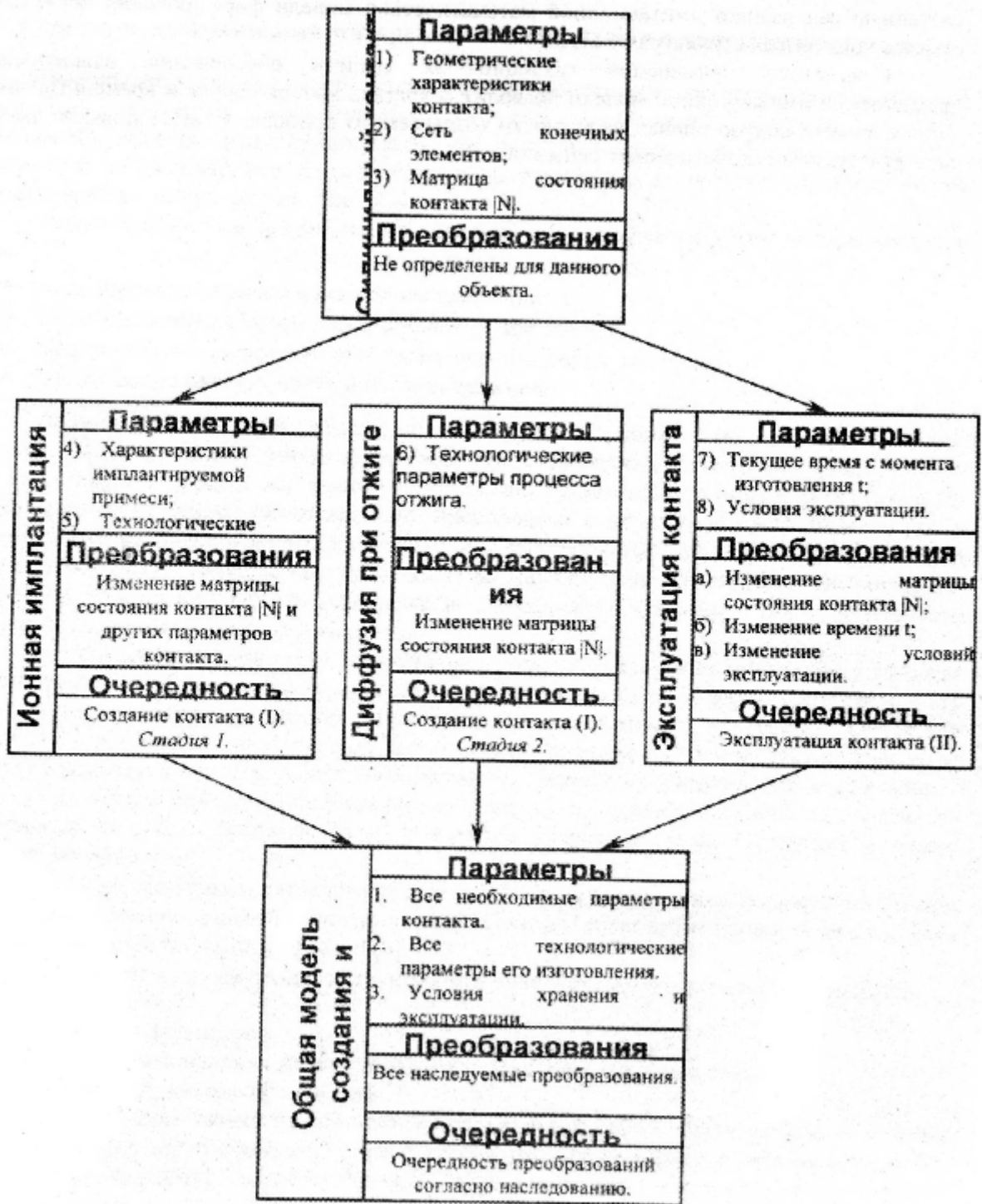


Рис. 5. Структурное описание объектов в программе прогнозирования отказов силицидных контактов.

4. Особенности системного подхода к оценке технологичности конструкции изделий на всех этапах их жизненного цикла.

В настоящее время Единая система технологической подготовки производства (ЕС ТПП), как комплекс стандартов, продолжает оставаться основной базой для

повышения эффективности процессов обработки ТК изделий.

Однако, локальный анализ формирования технологичности на отдельных взятых стадиях разработки изделия не позволяет выявить структуру ТК изделия как свойства, зависящего не только от его конструктивного состава, но и от конкретных технологических условий производства. То есть проблему обеспечения технологичности изделий необходимо решать с системных позиций, комплексно на всех этапах жизненного цикла изделий, в связи с чем процессы обработки конструкции на технологичность также необходимо рассматривать без потери целостности системы на этих этапах [11].

В САПР технологического проектирования появился новый класс задач, например, автоматизированная обработка ТК изделий ЭВА на базе качественной информации и компетентности экспертов конструкторов и технологов на всех этапах жизненного цикла изделий, решение которых невозможно традиционными формальными методами. Этот класс задач может быть определен как интеллектуальные задачи. При этом экспертная система (ЭС) открывает перспективный подход к решению такого рода задач.

Экспертные системы (теория и практика) представляют раздел искусственного интеллекта, получивший в последнее время бурное развитие в рамках нового самостоятельного направления - инженерии знаний.

С технической точки зрения ЭС - это прикладной пакет программ (специализированная техническая система), предназначенная для решения так называемых интеллектуальных задач на основе знаний проблемной области и опыта специалистов, представленного множеством машинных процедур и описаний.

Такие задачи имеют определенную специфику, которая заключается в следующем [9]:

- нечеткой постановке или неполноте исходных данных задачи;
- отсутствии точного алгоритма решения задачи;
- ограниченного числа возможных исходов, подлежащих анализу;
- невозможности формализации задачи (задача не может быть определена в числовой форме или цели задачи не могут быть выражены в терминах точно определенной целевой функции);
- существенном использовании механизмов индукции и других нетрадиционных логических исчислений.

С функциональной точки зрения, задачи, решаемые ЭС, классифицируются по следующим группам: задачи интерпретации; диагностика; контроль; прогнозирование; планирование (управление); проектирование.

5. Основные положения создания экспертных систем, как компонент САПР

ТП.

Экспертная система (ЭС) является искусственной системой способной в данной предметной области эффективно заменять эксперта - человека [7]. ЭС представляет собой технический комплекс лингвистических, информационных, программно-технических средств, который обеспечивает организацию, накопление, хранение, обновление и представление для использования специально подготовленных композиций знаний как рациональных, прежде всего эвристических, так и строгих - дедуктивных, силлогических, предназначенных для решения точно определенного класса задач, относящихся к некоторой предметной или проблемной области.

ЭС, в отличие от систем, основанных на использовании только строгого, дедуктивного, силлогического знания, способны решать практические задачи в условиях, когда исходные данные, характеризующие содержание задач, неполны или чрезмерно избыточны, противоречивы, не определены по степени своей достоверности.

Создание и использование ЭС наиболее эффективно в тех случаях, когда решение поставленных задач в силу их природы, особенностей постановки, состояния теории объектов, составляющих предмет задачи, или по каким-либо иным причинам не сводится к формальным вычислительным процедурам и требует использования рационального, в частности эвристического, знания [8].

Основные компоненты ЭС представлены на рис. 6.

База знаний ЭС содержит множество описаний объектов и отношений между ними, множество единиц знаний различного уровня общности в виде утверждений, справедливых к определенному уровню достоверности для использования при постановке, реализации, анализе результатов решения задач определенного класса в данной предметной области.

Процессор логического ввода выполняет набор процедур для обработки единиц знаний, содержащихся в базе знаний. Эти процедуры инварианты к семантике утверждений, накапливаемых в базе знаний ЭС.

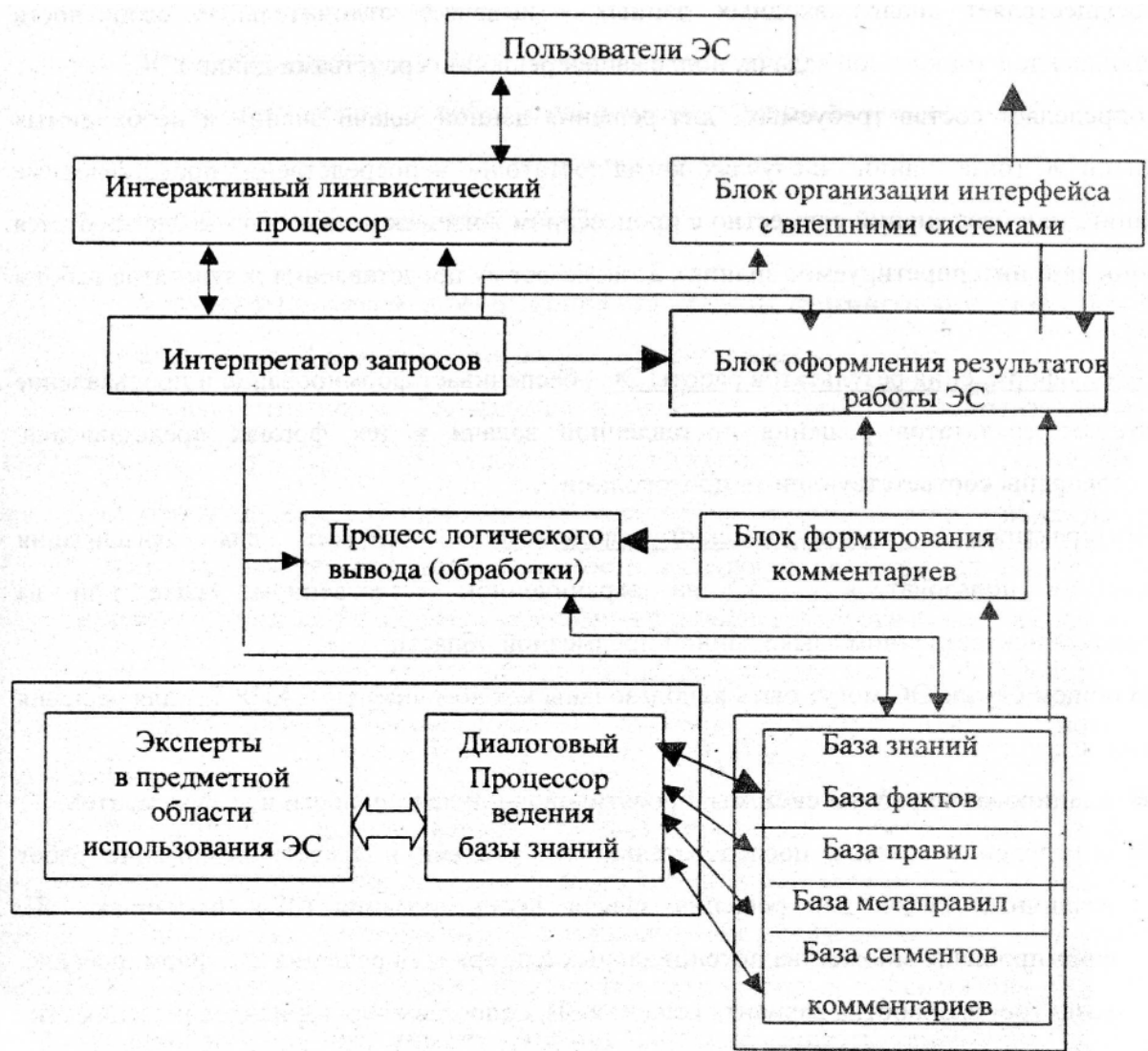


Рис.6. Основные компоненты экспертной системы [8].

Блок формирования комментариев обосновывает и поясняет решения и рекомендации, вырабатываемые ЭС, а так же формирует сообщения о схемах, путях, методах, средствах, с помощью которых были получены эти решения и рекомендации.

Интерпретатор запросов, используя метазнания, определяют тактику поиска решения:

- осуществляет анализ входных данных - выявляет отличительные особенности постановки каждой конкретной задачи, подлежащей решению средствами данной ЭС;
- определяет состав требуемых для решения данной задачи знаний и необходимых компонентов ЭС (база знаний - в случаях, когда достаточно непосредственно представлены в ней знания, или база знаний совместно с процессором логического вывода - когда требуется обобщенное или интерпретируемое знание), а также форму представления результатов работы ЭС.

Блок оформления результатов работы ЭС обеспечивает формирование и

предъявление пользователю результатов решения поставленной задачи в тех формах представления, которые оговорены соответствующими протоколами.

Интерактивный лингвистический процессор - служит для организации взаимодействия пользователя с ЭС на ограниченном естественном языке или на специфическом искусственном языке данной предметной области.

В общем случае ЭС могут быть использованы как компоненты САПР ТП для решения следующих задач:

- планирование работы системы, проектировочной деятельности и ее фрагментов;
- определение состава, последовательности, условий и средств реализации работ различных видов для решения задачи проектирования (ЗП): постановка ЗП, формирование множества потенциальных альтернатив решения ЗП, формирование, развитие, проработка варианта решения ЗП, сопоставления вариантов решения ЗП;
- формирование проектных решений.

Важной особенностью ЭС является использование знаний экспертов при решении задач. Собственно, экспертная система и призвана заменить человека-эксперта при решении проблем.

Согласно определению [10]: эксперт - это человек, который благодаря обучению и опыту может делать то, что остальные люди делать не умеют; эксперты работают не просто профессионально, но к тому же уверенно и эффективно.

Одним из основных критериев применимости ЭС является достигаемая эффективность замены системой человека эксперта.

Для реализации ЭС необходимо [9]:

1. Определить круг задач, возлагаемых на систему.
2. Получить знания у экспертов.
3. Формализовать знания (эксперта) в виде машинных процедур, правил и описаний. Построить базу знаний.
4. Разработать программный интерфейс с пользователем ЭС.
5. Разработать механизмы обработки и «редактирования» знаний.
6. Разработать механизмы обучения и накопления новых знаний.
7. Построить подсистему объяснений.

6. Многоуровневая информационная модель формирования технологичности конструкций изделий ЭВА на различных этапах создания.

Поскольку изменение ТК изделия в процессе разработки и производства носит динамический характер, его удобно представить с помощью многоуровневой

информационной модели формирования ТК изделий на различных этапах из создания (рис. 7). На всех уровнях понятие технологичности изделия изменяется, следуя за развитием изделия как усложняющейся модели, переходящей из сферы теоретических представлений (I и II уровни) в сферу конкретной материальной реализации (III, IV, V уровни). Каждый уровень характеризуется введенными новыми количественными показателями технологичности [11].

В частности для четвертого уровня предложен обобщенный коэффициент согласованности конструкции изделия с технологией изготовления - $K_{ст}$, выраженный как сумма ранжированных критериальных коэффициентов согласованности: технологичности деталей $K_{дт}$, сборки $K_{сб}$, настройки - $K_{тн}$, а также технологичности оснащения - $K_{сто}$. Если $K_{ст} = 1$, то технологию для данного изделия, можно считать полностью освоенной и стандартной, а изделие - технологичным.

6.1 Алгоритм отработки технологичности конструкции изделия эвристическим методом с использованием принципа минимума разногласий экспертов.

Управление отработкой технологичности с помощью экспертных оценок заключается в том, что экспертизы проводятся отдельно по двум группам специалистов (конструкторов - разработчиков и технологов - изготовителей) с последующим выявлением разногласий обобщенных оценок. В качестве экспертов привлекаются специалисты разработчика и изготовителя, которые, несмотря на единство глобальных целей, имеют определенные различия в подходах к оценкам конструктивно-технологических свойств изделия. Показатель уровня отработанности конструкций на технологичность определяется как приведенный коэффициент разногласий экспертов [11].

Уровни моделей

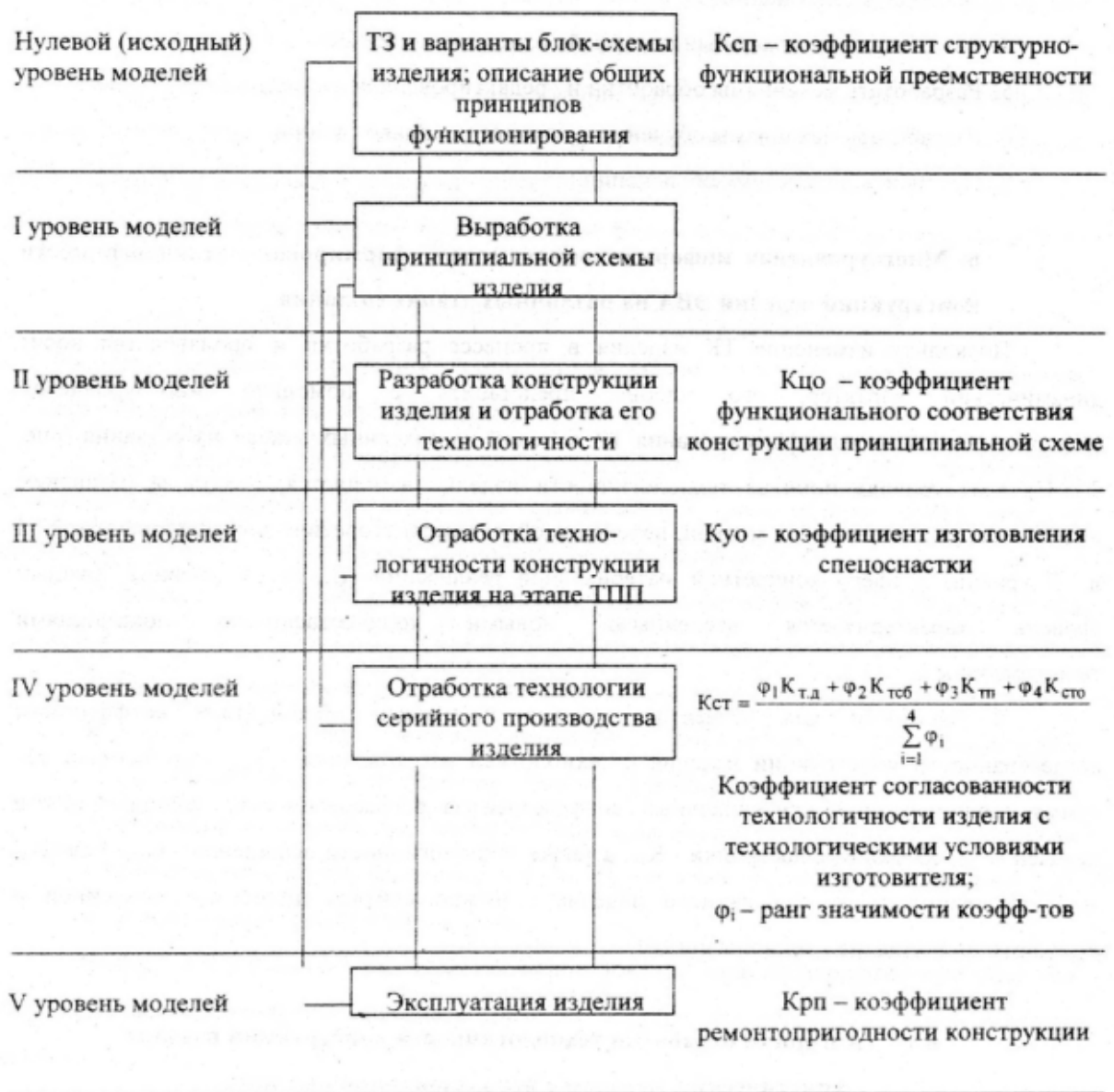


Рис. 7. Многоуровневая информационная модель формирования ТК изделий на различных этапах создания [11]

$$K_{IP_j} = \frac{|\Psi_j^{k_n} - \Psi_j^{T_x}|}{\bar{\Psi}_o},$$

где $\Psi_j^{k_n}, \Psi_j^{T_x}$ - относительная значимость j-го фактора технологичности по экспертным оценкам конструкторов и технологов соответственно по отношению к усредненному уровню разногласий $\bar{\Psi}_o$, определяемого как

$$\Psi_o = \frac{\sum_{i=1}^k |\Psi_i^{k_n} - \Psi_i^{T_x}|}{k},$$

где k - число малозначащих факторов технологичности конкретного изделия, по которым у экспертов нет разногласий.

Алгоритм обработки ТК изделий по критерию минимизации уровня разногласий оценок экспертов представлен на рис. 8.

6.8 Алгоритм экспертной оценки технологичности конструкции изделия на базе измеряемой качественной информации.

Для получения оптимального (по критерию влияния на технологичность) набора факторов (измеряемой качественной информации), которые, по мнению специалистов, наиболее полно и всесторонне отражают качественные характеристики конструкции изделия, обычно используется эмпирический метод выбора информационных признаков из возможно полной их совокупности. При этом определяющими требованиями выбора должны быть наибольшая информативность и простота процедуры ранжирования.

Для реализации экспертной оценки ТК изделия необходимо провести выбор [11]:

- экспертов и состава экспертной группы;
- регламента экспертизы, позволяющего повысить достоверность информации при наименьшем численном составе группы экспертов и трудоемкости работы;
- метода определения степени коррелированности ранжирований экспертов;
- порядка обработки полученных оценок с анализом их достоверности.

Алгоритм получения экспертной оценки ТК изделия представлен на рис. 9.

6.1 Модель автоматизированной экспертной оценки технологичности конструкции изделия по стадиям разработки.

На основе организованного математического и методического обеспечения реализации экспертной оценки технологичности конструкции изделия может быть построена модель автоматизированной системы экспертной оценки ТК изделия (рис. 10.), которая сравнительно легко может быть встроена в действующие на многих предприятиях отрасли современные САПР.

Система способствует реализации задач выбора оптимальных технических решений, что особенно важно, так как по мере развития проекта влияние этих решений на затраты, как правило, возрастают и любое радикальное конструкторское изменение, вносимое в проект, способствует росту затрат по экспоненциальному закону.

Структура программного обеспечения автоматизированной системы экспертной оценки ТК изделия представлена на рис. 11.

Управление обработкой технологичности изделий ЭВА с использованием принципа минимизации разногласий качественных и количественных экспертных оценок позволило сократить более чем на 30% количество замечаний при приемке КД у разработчика и в 3 раза поток требований на внесение конструкторско-технологических изменений в КД в процессе освоения и серийного производства изделий [11].

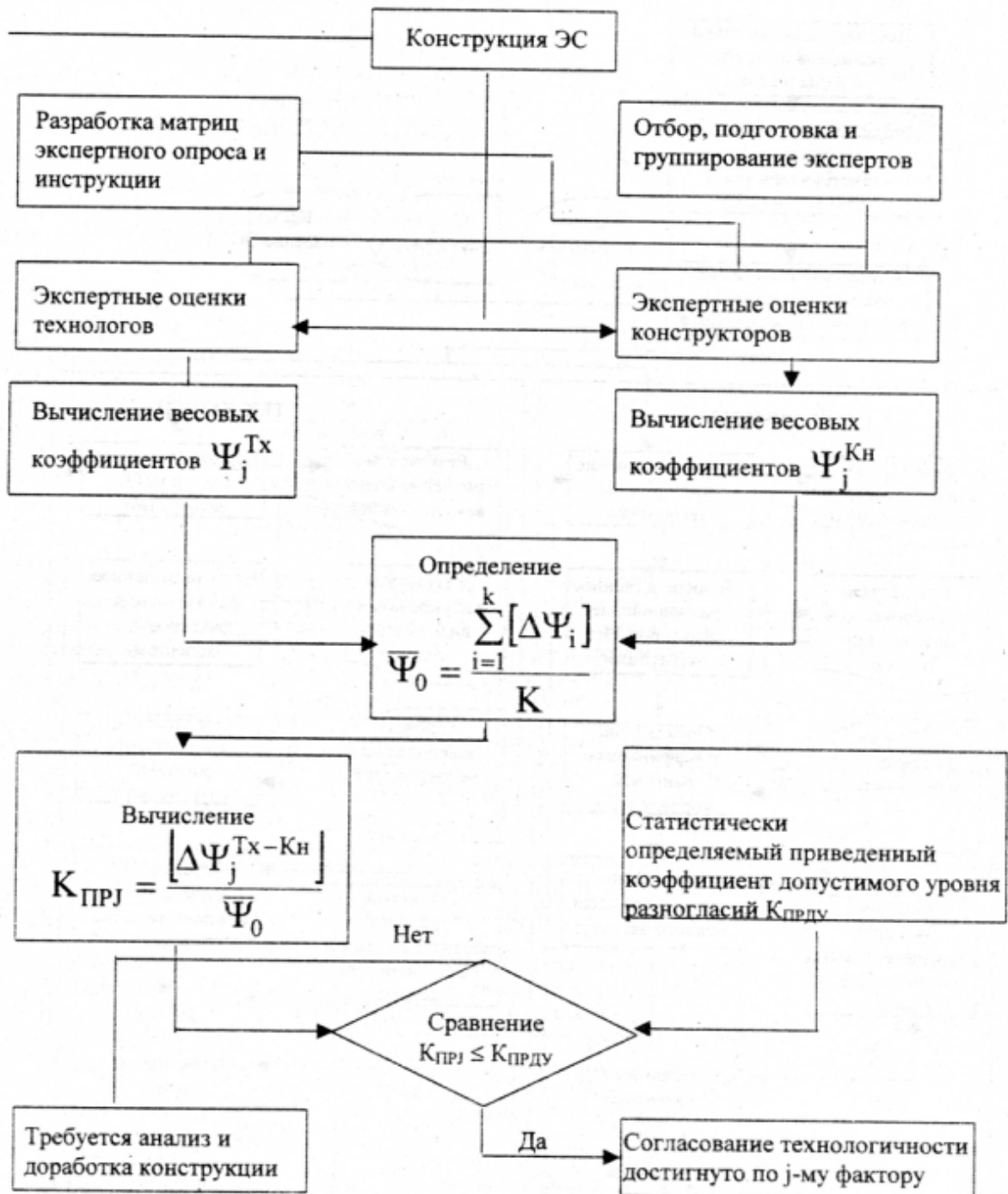
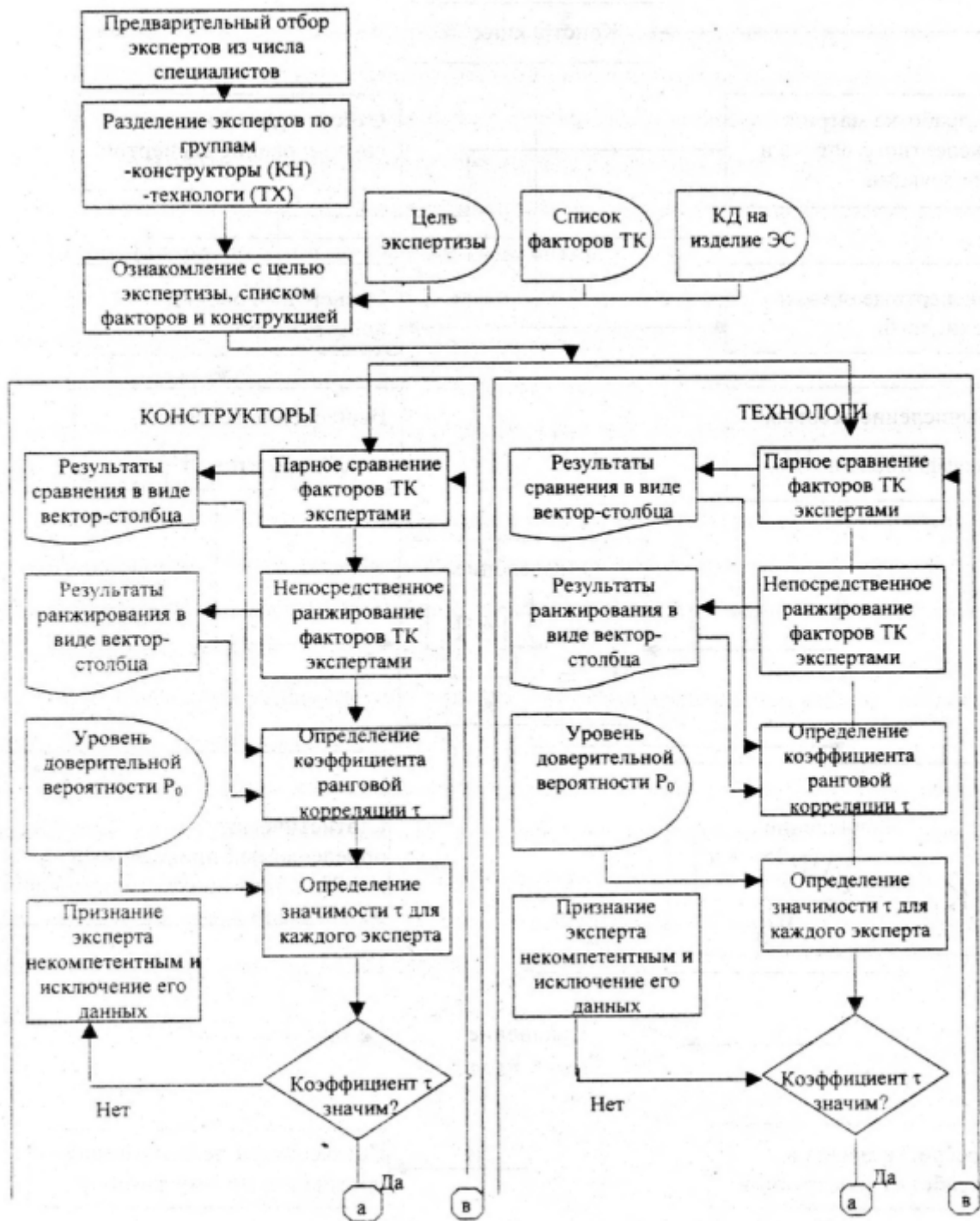
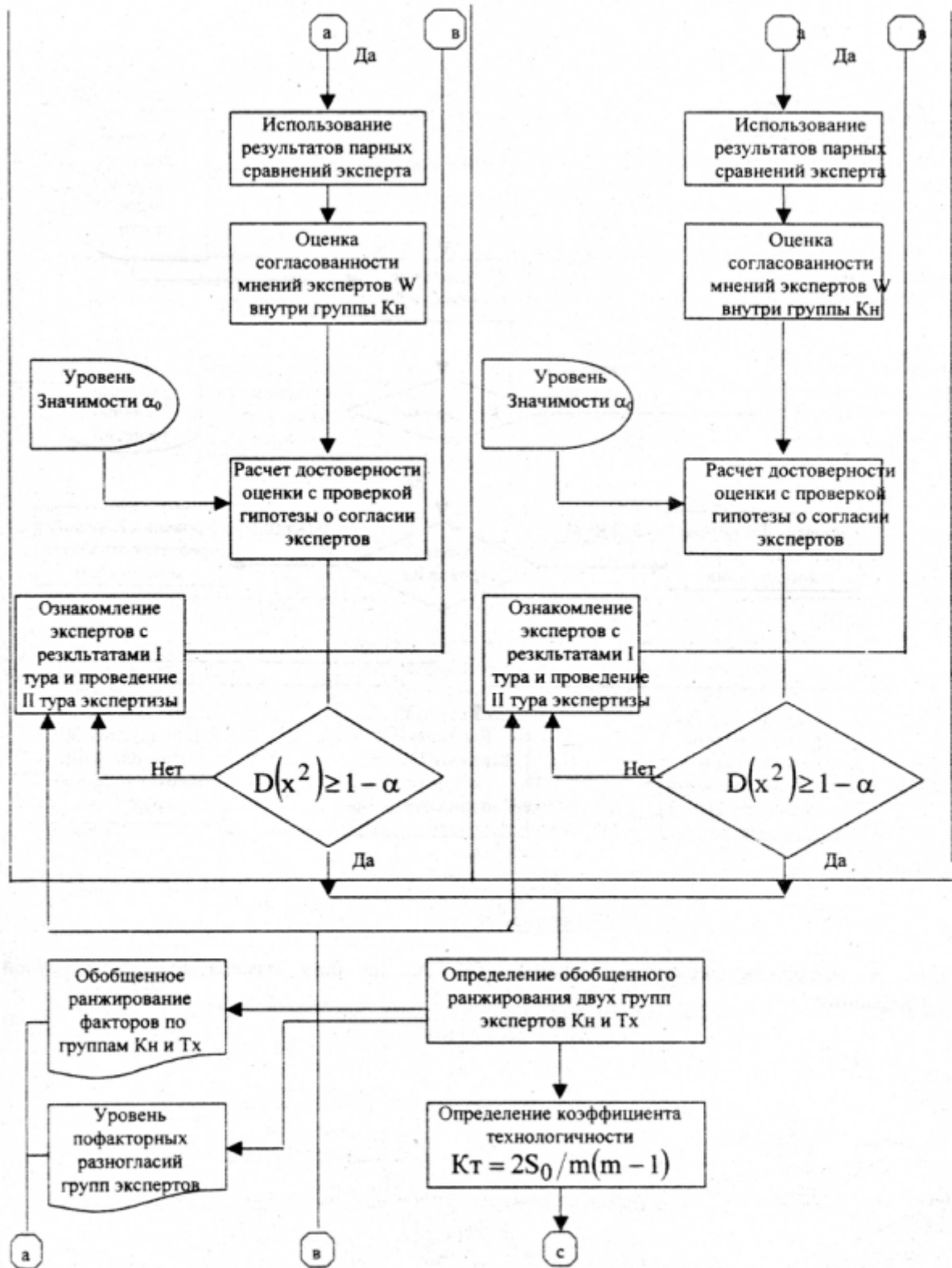


Рис. 8. Алгоритм обработки ТК ЭС эвристическим методом с использованием принципа минимума разногласий экспертов [11].





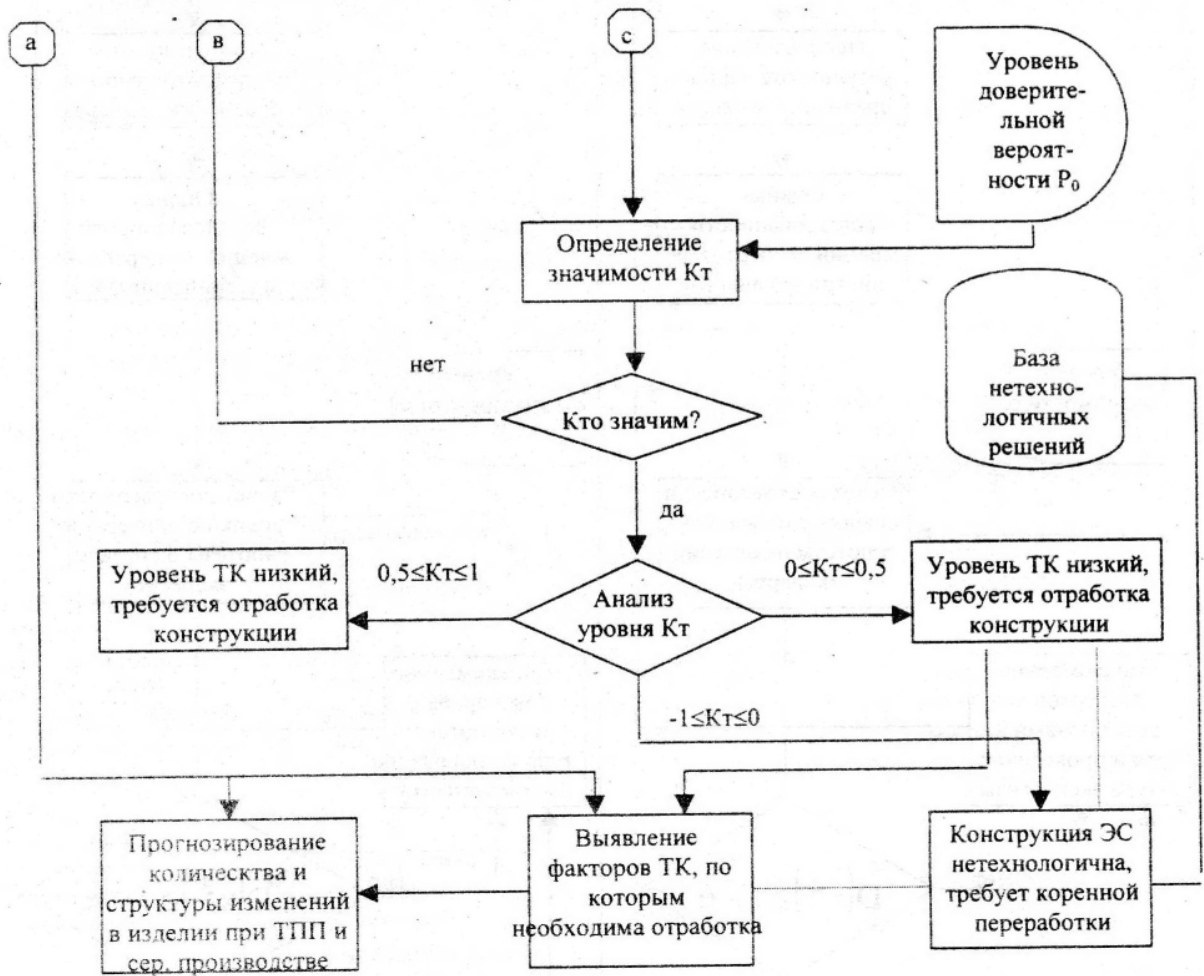


Рис. 9. Алгоритм экспертной оценки ТК ЭС на базе измеряемой качественной информации [11].

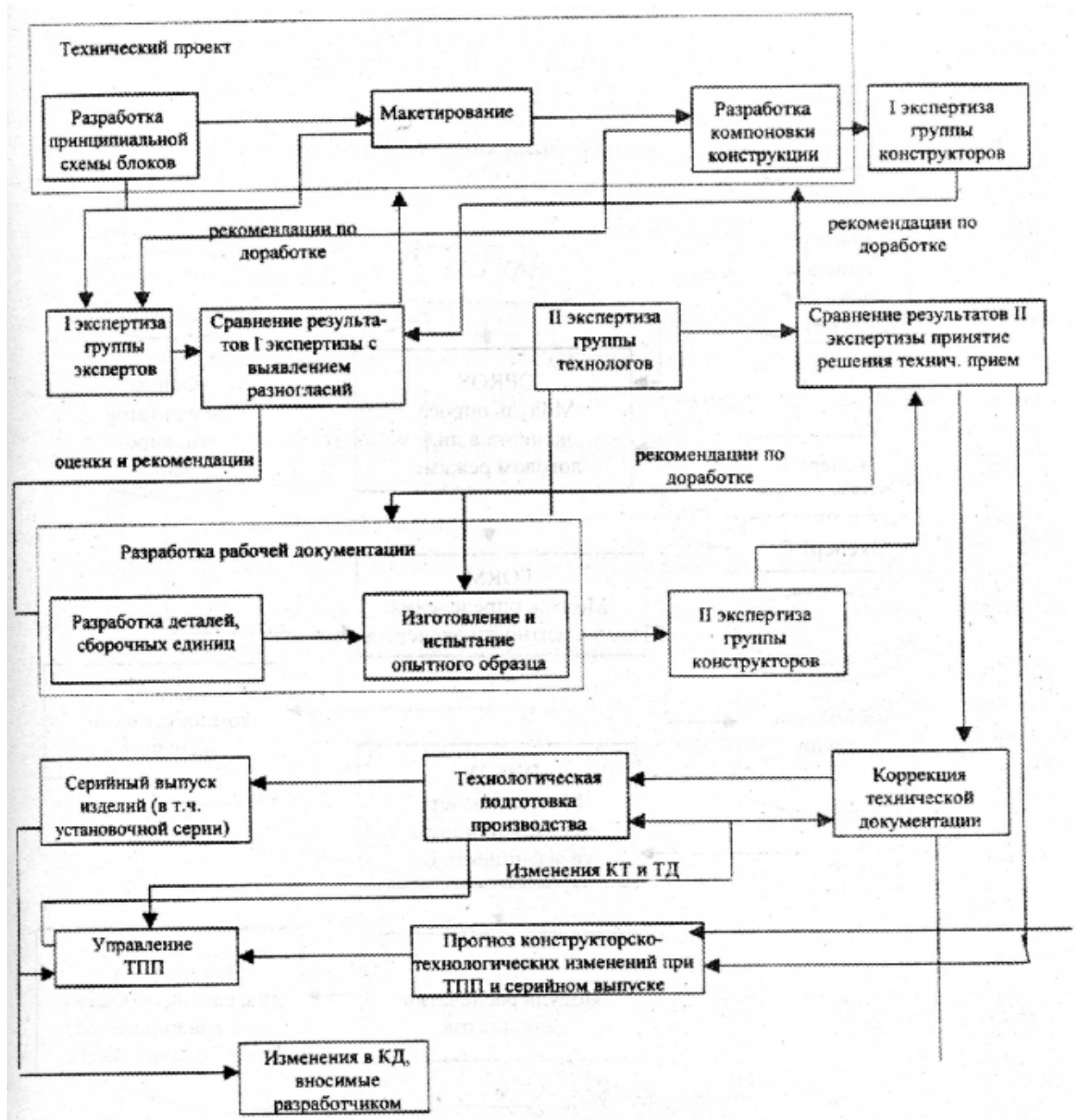


Рис. 10. Модель автоматизированной экспертной оценки ТК ЭС по стадиям разработки [11].

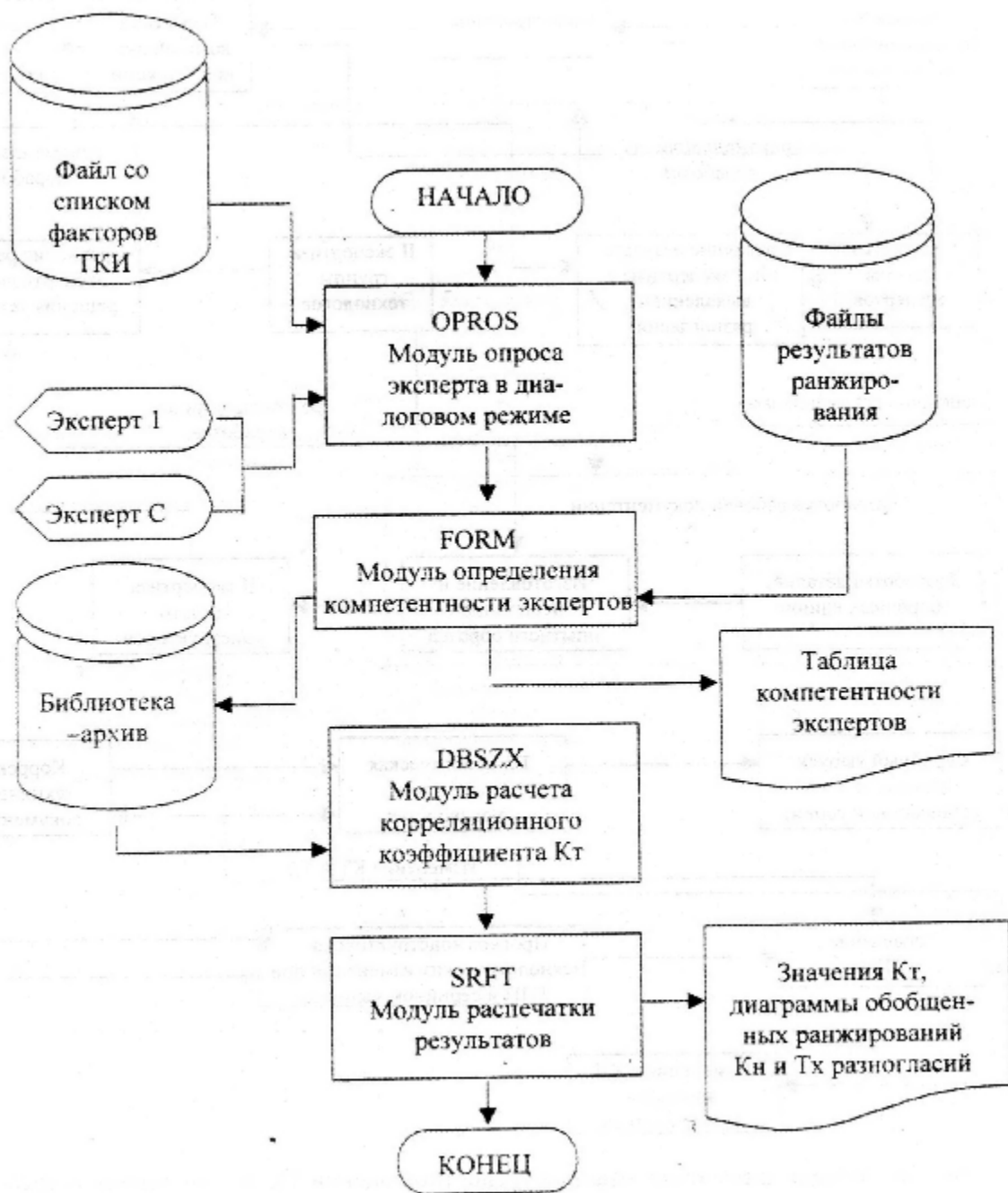


Рис. 11. Структурная схема программного обеспечения автоматизированной системы экспертной оценки ТК ЭС на базе качественной информации [11].

Контрольные вопросы.

1. Каковы основные положения создания экспертных систем, как компонент САПР ТП?
2. Каковы основные отличительные особенности построения многоуровневой информационной модели формирования технологичности конструкции электронной аппаратуры на различных этапах ее создания?
3. Какова сущность алгоритма обработки технологичности конструкции изделия эвристическим методом с использованием минимума разногласий экспертов?
4. Какова концепция построения модели автоматизированной экспертной оценки технологичности конструкции изделия по стадиям разработки?
5. Перечислите основные направления применения имитационного моделирования в САПР ТП производства электронной аппаратуры.
6. Какова сущность концептуальной модели формирования отказов контактных структур?
7. Дайте характеристику структуры программы имитационного моделирования и прогнозирования отказов силицидных контактных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов/ Под. ред. П.Антонетти, Д.Антониадиса, Р.Даттона, У.Оулдхема: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1988. - 496 с.
2. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988. - 232 с.
3. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II: Пер. с англ.—М.:Мир. 1987.—646 с., ил.
4. Физические основы надежности интегральных схем./ Под. ред. Ю.Г.Мюллера. - М.: Сов. Радио, 1976. - 318 с.
5. Алексеева Е.Ф., Стефанюк ВЛ. Экспертные системы - состояние и перспектива // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1984, № 5, с. 153 - 167.
6. Seshan, K., The Quality and Reliability of Intel's Quarter Micron Process Intel Technology Journal, 3'98.
7. Тонкие пленки: Взаимная диффузия и реакции. / Под ред. Дж. Поута и др.: Пер. с англ. - М.:Мир, 1982.
8. Ступаченко А.А. САПР технологических операций. - Л.: Машиностроение, 1988.- 234 с.
9. Герман О.В. Введение в теорию экспертных систем и обработку знаний. / - Мн.: Дизайн ПРО, 1995,-255 с.
10. Уотерман Д. Руководство по экспертным системам. М., Мир, 1989,- 390 с.
11. Адамов А.П. Теоретические и прикладные основы системы отработки технологичности электронных средств: Автореф. Дис.... док.техн.наук: 05.12.13.- Москва, 1997,- 49.