

2001-285

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ

На правах рукописи

**ОМОРОВ ДЖАНЫБЕК ДУЙШОНБЕКОВИЧ**

УДК 681.3.06

**ПРИНЦИПЫ И АЛГОРИТМЫ  
ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ  
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

05.13.06 – применение вычислительной техники,  
математического моделирования и математических  
методов в научных исследованиях

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

БИШКЕК - 2001

Работа выполнена в Институте автоматизации проектирования Российской академии наук и Институте автоматики НАН Кыргызской Республики

Научный руководитель:  
Доктор технических наук

Бененсон З.М.

Официальные оппоненты:  
Доктор технических наук  
Кандидат технических наук

Батырканов Ж.И.  
Ямпольская С.А.

Ведущая организация - **Институт информатики и информационных технологий при МОиК КР**

Защита диссертации состоится 24 мая 2001 г. в 10:00 часов на заседании Специализированного совета Д 05.98.81 при Институте автоматики НАН Кыргызской Республики по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265 а  
Телефон: 25-43-73

С диссертацией можно ознакомиться в Институте автоматики НАН Кыргызской Республики

Автореферат разослан " 20 " апреля 2001 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
кандидат технических наук

Пресняков К.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время без системы автоматизации проектирования (САПР) невозможно создание современных радиоэлектронных устройств (РЭУ). Важное место в комплексе САПР занимают задачи моделирования. Моделирование, или проведение вычислительного эксперимента на основе математической модели, является базисом, на котором строится схемотехнический анализ и параметрическая оптимизация.

Если первоначально главное внимание уделялось логическому моделированию больших схем, то сегодня основное внимание уделяется универсальным программам моделирования схем, или программам анализа; они разрабатываются для моделирования любых видов электрических цепей и позволяют детально моделировать различные электрические режимы. Такое моделирование очень дорогое из-за недостаточной эффективности и гибкости существующих систем моделирования.

В целом эффективность моделирования зависит от трудоемкости получения результатов анализа и их точности.

Несмотря на бурное развитие методов в этой области и появление различных систем моделирования, остается постоянная потребность на эффективные системы моделирования для выбранного класса моделируемых объектов, а также потребность на системы моделирования, которые гибко настраивались бы на эти заданные классы объектов и задач. Эта потребность объясняется, во-первых, увеличением ассортимента элементов и устройств в современных РЭУ, во-вторых, разнообразием задач проектирования при великом различии в характеристиках располагаемых вычислительных средств.

Таким образом, весьма актуальной является задача разработки эффективных математических методов машинного анализа электронных и электро-механических устройств.

**Целью работы** является разработка алгоритмов и принципов построения гибких и эффективных систем моделирования динамических объектов на примере радиоэлектронных (электро-механических) устройств.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Обоснованы принципы построения гибкой и эффективной системы моделирования динамических объектов.

2. Предложены методы и алгоритмы, позволяющие автоматизировать моделирование динамики широкого класса электронных (электро-механических) систем с блочно-модульной структурой.

3. Разработан алгоритм учета латентности (различной активности переменных). Предложенный алгоритм не требует больших вычислительных затрат для анализа переменных на активность. Предложен метод топологической декомпозиции.



4. Построена гибкая система схемотехнического моделирования на основе предложенных принципов и алгоритмов.

**Научная и практическая ценность работы.** Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при реализации систем моделирования широкого класса динамических объектов, описываемых системой алгебро-дифференциальных уравнений.

Предложенные методы и алгоритмы реализованы в рамках программной системы КАПР-РЭ. Исполнительные программы системы написаны на языке FORTRAN 77 и работают в вычислительной среде VAX/VMS.

Результаты диссертационной работы были внедрены для решения задач моделирования сложных динамических объектов в научной лаборатории Проектно-конструкторского и технологического института «Водавтоматика и метрология».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

Международной конференции «Проблемы управления и информатики» (г. Бишкек, 2000 г.).

Научном семинаре в Центре автоматизации проектирования БИС (г. Москва, 1995);

Научном семинаре в Институте автоматизации проектирования Российской академии наук (г. Москва, 1992);

Всесоюзном семинаре по системам автоматизации проектирования «САПР-90» (г. Гурзуф, 1990 г.);

Научной конференции Московского физико-технического института; (г. Долгопрудный, 1989 г.);

Научном семинаре в Институте автоматики НАН КР (2000 г.);

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы из 105 наименований. Основной текст диссертации занимает 135 страниц машинописного текста.

Автор выражает признательность научному консультанту доктору технических наук Оморову Т.Т. за внимание и ценные замечания.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Введение.** Во введении обоснована актуальность темы диссертации и сформирована цель работы. Показана научная новизна полученных результатов и отмечена их практическая ценность, а также дана краткое содержание работы.

**Первая глава** посвящена принципам, которые положены в основе разрабатываемой системы моделирования.

Прежде всего, это принцип объектно-ориентированного программирования. Он обуславливает компактность и гибкость системы, суть которых состоит в обеспечении доступа многих функций к общим структурам данных в условиях отсутствия информации о деталях реализации этих структур или явного обмена данными между ними. Это позволяет строить целые сборки программных модулей при незначительном объеме специальной программы, обеспечивающей их соединение.

Второй принцип, взятый в основе системы, — принцип блочно-компонентной структурности исследуемых объектов. То есть выделяется класс объектов (электронных схем), которые можно собирать с помощью ограниченной группы так называемых "базисных элементов". Это принцип обуславливает такие свойства системы, как эффективность в смысле быстродействия и гибкость в смысле перенастраиваемости на различные классы моделей базисных элементов. Эффективность при этом достигается за счет фиксирования набора базисных элементов, так как при этом компонентные уравнения элементов сводятся к наиболее удобному для интегрирования виду с учетом применяемого метода интегрирования.

Рассмотрены принципы численного расчета нелинейной динамической схемы на основе дискретизации, линеаризации и итерационного решения с помощью модификаций метода Ньютона, и приводится общая структура разрабатываемой программы моделирования.

Численное моделирование динамической системы заключается в составлении и решении системы алгебро-дифференциальных уравнений вида

$$\Phi(x', x, t) = 0 \quad (1)$$

при заданных начальных условиях. Алгоритмы дискретизации преобразуют (1) к неявной итерационной формуле

$$F(x_{n+1}, t_{n+1}) = 0 \quad (2)$$

для дискретной точки  $t = t_{n+1}$ . Часто для решения нелинейной системы алгебраических уравнений (2) используют метод Ньютона. Это по сути — итерационный метод, основанный на использовании первых двух членов ряда Тейлора:

$$\begin{cases} x_{n+1}^0 = x_n^0, \\ F(x_{n+1}^m, t_{n+1}) + [dF(x_{n+1}^m, t_{n+1})/dx] * (x_{n+1}^{m+1} - x_{n+1}^m) = 0, \\ x_{n+1}^N = x_{n+1}^N \end{cases} \quad (3)$$

где  $m$  — индекс итерации Ньютона, а  $N$  есть число итераций Ньютона, являющееся достаточно большим, при котором достигается требуемая точность решения. Введя новые обозначения, итерационную формулу (3) можно переписать так:

$$\begin{cases} A(x_{n+1}^m, t) * s = b(x_{n+1}^m, t), \\ x_{n+1}^{m+1} = x_{n+1}^m + s \end{cases} \quad (4)$$



Здесь для удобства нижние индексы, т.е. индексы дискретных моментов времени, опущены;  $A(\cdot) = dF/dx$  есть Якобиан системы (матрица размера  $p \times n$ ),  $b(\cdot) = -F$  есть вектор невязки. Из первого матричного уравнения (4) находим величину шага по Ньютону  $s^m$ .

Таким образом, решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (1) сводится к многократному решению системы линейных алгебраических уравнений (4). Далее будет показано как мы сможем сразу эффективно заполнять матрицу  $A(\cdot)$  на каждом шаге итерации Ньютона для каждого момента времени и решать систему (4).

Предложена классификация методов дискретизации и численного интегрирования, на основе которой выделены жестко устойчивые методы, поскольку уравнения модели РЭУ являются, как правило, жесткими.

Используемый линейный многшаговый метод дает возможность автоматически выбирать оптимальный шаг интегрирования и порядок аппроксимирующего полинома на основе легко вычисляемой ошибки округления и ее сравнения с заданной погрешностью решения. Такая самонастройка неявных методов интегрирования позволяет преодолеть "барьер постоянной времени".

**Вторая глава.** Вторая глава посвящена вопросам выбора независимых переменных и автоматического формирования системы уравнений модели схемы. Система уравнений модели схемы формируется на основе топологических уравнений (закона токов Кирхгофа и закона напряжений Кирхгофа) и компонентных уравнений, описанных в моделях базисных элементов.

Моделируемая схема составляется из базисных элементов, которые соединяются между собой своими выводами. Так, типичный двухполюсный элемент показан на следующем рисунке.

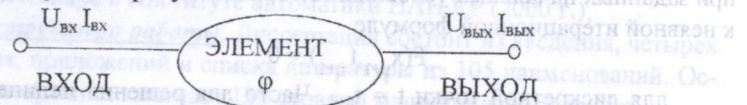


Рис.1

В качестве переменных, характеризующих состояние моделируемой схемы, предлагается взять а) потенциалы  $U_{\text{ВХ}}$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}$  и токи  $I_{\text{ВХ}}$ ,  $I_{\text{ВЫХ}}$ , связанные с выводами составляющих схему элементов, а также б) внутренние переменные ( $\phi$ ) элементов схемы, то есть переменные, входящие в компонентные уравнения только данного элемента.

При таком выборе переменных, во-первых, легко учитываются как линейные, так и нелинейные компоненты схемы, уравнения которых представляют функцию одного или нескольких аргументов; во-вторых, нет ограничений на вид функциональных зависимостей, связывающих токи и напряжения; в-третьих, удобно вводить в вектор неизвестных новых переменных. Последнее делается, как правило, для следующих двух случаев. а) Для учета каких-либо особых компонентных уравнений. б) Для упрощения функциональных

зависимостей в элементах матрицы Якоби. При таком выборе переменных нет "неудобных" ветвей, следовательно, не требуется преобразование исходной схемы. Наконец, при таком выборе переменных сразу получаем все значения токов и напряжений схемы в отличие от метода узловых потенциалов, при котором вычисляются только потенциалы узлов.

Компонентные уравнения, в свою очередь, состоят из собственно компонентных уравнений и уравнений закона токов Кирхгофа (ЗТК) для элементов. Топологические уравнения состоят из уравнений закона токов Кирхгофа для узлов и уравнений, выражающих равенство потенциалов на выводах элементов, подключенных к одному узлу.

ЗТК для узлов предлагается включить в систему уравнений модели непосредственно; а уравнение равенства потенциалов в узле - не включать в систему уравнений. Вместо этого выделить соответствующую общую ячейку памяти для каждого множества приравняемых потенциалов. Тем самым уменьшается как число уравнений, так и число переменных. Назовем этот подход принципом общей памяти (ПОП).

Рассмотрены методы формирования топологических уравнений.

1) Любую схему можно представить так, чтобы любой ее узел соединял только два вывода (вход и выход). Этого можно добиться введением базисного элемента KNOT в узлах с валентностью больше двух. Тогда топологические уравнения можно учесть с помощью принципа общей памяти (см. рис. 2). В этом случае принцип общей памяти используется, помимо ЗТК для узлов, также для учета ЗТК для элементов и дает следующий выигрыш в уменьшении размерности системы уравнений.

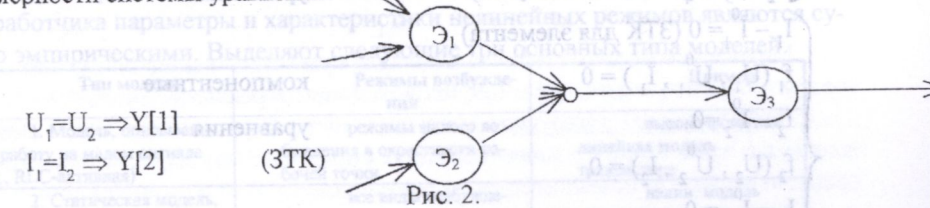


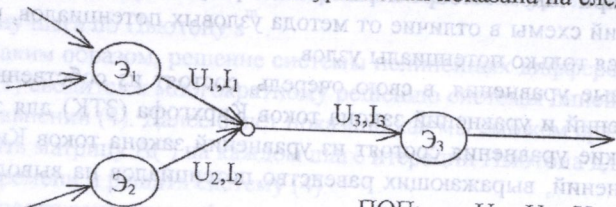
Рис. 2.

$E_1$ ,  $E_2$  - элементы, подключенные к интересующему нас узлу;  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $U_2$ ,  $I_2$  - потенциалы и токи выводов этих элементов; массив  $Y[*]$  - память, выделенная для переменных состояния.

Вместо четырех переменных ( $U_1$ ,  $I_1$ ,  $U_2$ ,  $I_2$ ) и двух уравнений получаем две переменные ( $Y[1]$ ,  $Y[2]$ ) без уравнений. (Заметим, что баланс числа уравнений и числа переменных сохраняется, т.е.  $4-2=2-0$ ). Однако, недостатком этого подхода является увеличение размера исходной схемы за счет введения в нее топологию элементов KNOT. Более удобным при формировании топологических уравнений является следующий подход.



2) Для потенциалов как и в предыдущем случае используется принцип общей памяти. А ЗТК для узла включается в систему уравнений. Эта процедура формирования топологических уравнений показана на следующем рисунке.



ПОП:  $U_1 = U_2 = U_3 \Rightarrow Y[1]$

ЗТК:  $I_1 + I_2 + I_3 = 0 \Rightarrow$

$Y[2] + Y[3] + Y[4] = 0$

Рис. 3.

Соответствующие изменения числа переменных и уравнений изобразим в следующей схематичной форме:

ПОП: 3 переменных - 2 уравнения = 1 переменная - 0 уравнений;

ЗТК: 3 перем. - 1 урав. = 3 перем. - 1 урав.

Система уравнений для участка схемы (узлы 1 и 2 на рис. 4.) выглядит так:

$$\begin{cases} U_1^0 = U_2^0 \Rightarrow Y[1] \\ I_1^0 - I_2^0 = 0 \\ U_2^0 = U_3^0 = U_4^0 \Rightarrow Y[2] \\ I_2^0 - I_3^0 - I_4^0 = 0 \text{ (ЗТК для узла)} \end{cases}$$

топологические уравнения

$$\begin{cases} I_1 - I_1^0 = 0 \text{ (ЗТК для элемента)} \\ f_1(U_1, U_1^0, I_1) = 0 \\ I_2 - I_2^0 = 0 \\ f_2(U_2, U_2^0, I_2) = 0 \\ I_3 - I_3^0 = 0 \\ f_3(U_3, U_3^0, I_3) = 0 \\ I_4 - I_4^0 = 0 \\ f_4(U_4, U_4^0, I_4) = 0 \end{cases}$$

компонентные уравнения

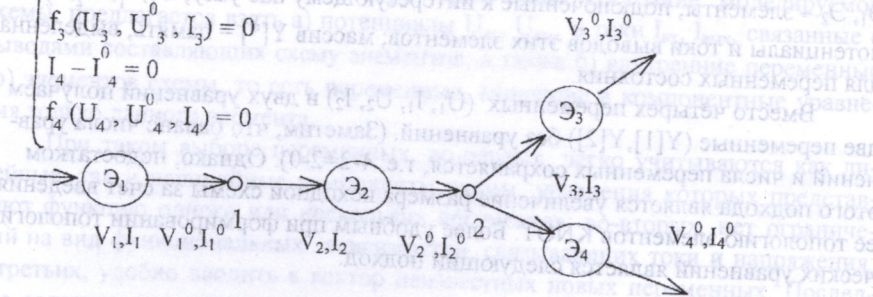


Рис. 4.

В программной системе компонентные уравнения описываются в разделах описаний базисных элементов. Они автоматически собираются при сборке модели схемы программой. Доказана корректность формируемой предложенным способом системы уравнений.

Модели таких важных базисных элементов, как полупроводниковые приборы, которые характеризуются рядом параметров: электрические (подвижность носителей, их времена жизни и др.) и технологические (геометрические размеры, профиль распределения примеси и др.). По этим параметрам путем моделирования полупроводникового прибора рассчитывают пространственные и временные зависимости электростатического потенциала и квази потенциалов Ферми для электронов и дырок. По этим величинам, в свою очередь, определяются векторные поля напряженности электрического поля и плотности электрического тока. Наконец, интегрированием первого из векторов по контуру между соответствующими контактами прибора, а второго - по площадям этих контактов находят внешние электрические характеристики прибора.

Разработчику же схемы нужны лишь количественные описания внешних электрических характеристик прибора, которые имели бы требуемую точность и были бы по возможности простыми. Как правило, ориентируются на отработанную технологию изготовления приборов и поэтому имеется возможность повысить точность моделей, эмпирически подбирая значения параметров в аналитических формулах модели.

Для целей уменьшения вычислительных затрат при расчете характеристик схемы нет смысла завышать точность, которая определена приближенным характером математической модели. Все имеющиеся в распоряжении разработчика параметры и характеристики нелинейных режимов являются строго эмпирическими. Выделяют следующие три основных типа моделей.

Тип модели	Режимы возбуждения	Пример
1. Модель, описывающая работу на малом сигнале (лин., RLC-активная)	режимы малого возбуждения в окрестности рабочей точки	высокочастотная линейная модель транзистора
2. Статическая модель, описывающая работу на большом сигнале (нелин., резистивная)	все виды возбуждения на постоянном токе	нелин. модель транзистора со смещением
3. Динамическая модель, описывающая работу на большом сигнале (нелин., RLC активная)	любое возбуждение	нелинейная переключательная модель транзистора

Модель третьего типа - динамическая модель для большого сигнала - является самой общей (следовательно, самой сложной) и ее называют глобальной моделью; именно она используется в системе КАПР-РЭ.

В основе модели полупроводникового диода, оформленного в системе КАПР-РЭ как простой агрегат DIODE, лежат физические процессы. Диод является самым простым полупроводниковым прибором и многие полученные



выводы при его моделировании используются в дальнейшем при построении моделей других полупроводниковых приборов. Распределение неосновных носителей заряда определяются выражениями

$$p(x) = p_0 (\exp(qv/kT) - 1) \exp(-x/L), \quad (5)$$

$$n(x=0) = n_0 (\exp(qv/kT) - 1), \quad (6)$$

где  $V$  – напряжение на переходе,  $L$  – длина диффузии;  $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $kT/q = 25.86 \cdot 10^{-3}$  В при  $T = 300$  К – термическое напряжение; Выражение для тока на выводах диода определяются следующими выражениями:

$$i_p = -q A D_p dp/dx, \quad (7)$$

$$i_n = -q A D_n dn/dx, \quad (8)$$

где  $A$  – площадь сечения перехода,  $D_p$  и  $D_n$  – соответствующие коэффициенты диффузии. Суммарный ток  $i = i_p(x=0) + i_n(x=0)$ . Учитывая уравнения (5)-(8), получают уравнение идеального диода  $i = I_s (\exp(qv/kT) - 1)$ .

Вольт-амперная характеристика реального диода, взятая из справочника по полупроводниковым приборам, показана на рис. 5.

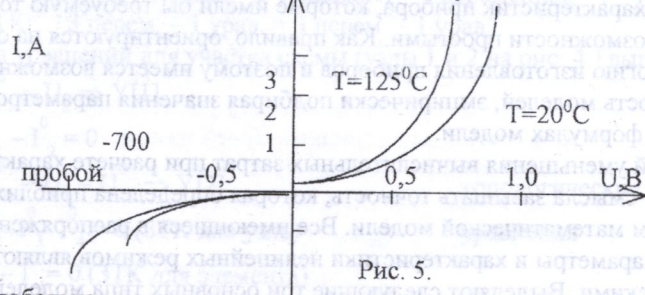


Рис. 5.

Глобальная модель строится на основе уравнения идеального диода с учетом нижеприведенных эффектов, происходящих в реальном диоде.

А) Статические эффекты: (i) инжекция низкого уровня при малом смещении; (ii) пробой при большом обратном смещении; (iii) эффект омического сопротивления при большом прямом смещении.

Таким образом, характеристика реального диода разбивается на три участка и задается следующим уравнением:

$I_D (\exp(qV_D/nkT) - 1) + V_D / R_{перех}$	в I;
$I_D = f(V_D) = -I_S + V_D / R_{перех}$	в II;
$-I_S (\exp(-q(V_{проб} + V_D)/kT) - 1) + V_D / R_{перех}$	в III.

где коэффициент  $n \leq 2$  является эмпирически подбираемой константой;  $R_{перех} = 10^{13}$  Ом – это большое сопротивление, которое включается параллельно к каждому рп-переходу в модели, чтобы улучшить сходимость при решении нелинейных уравнений;

Б) Динамические эффекты. Это прежде всего эффекты накопления зарядов на рп-переходе. Если бы не учитывать эти эффекты, то прибор был бы неинертным, т.е. бесконечно быстрым. Имеются два вида накопления заряда: диффузионный заряд  $Q_d$  и барьерный заряд  $Q_b$ . Эти эффекты учитываются введением в модель следующих эквивалентных нелинейных емкостей:

$$C_d(V_D) = dQ_d/dV_D, \quad C_b(V_D) = dQ_b/dV_D.$$

$Q_d = \tau_D I_D(V_D)$ , где  $\tau_D$  – время переноса носителей заряда через рп-переход;  $Q_b = C_b(0) \int_0^{V_D} (1 - V/\Phi_0)^{-m} dV$ , где  $\Phi_0$  – встроенный потенциал перехода,  $m$  – показатель степени для барьерной емкости. Полный заряд  $Q = Q_d + Q_b$ . Полная емкость  $C_D(V_D) = dQ_D/dV_D = \tau_D dI_D/dV_D + C_b(0)(1.0 - V_D/\Phi_0)^{-m}$ . Как видно из последнего выражения, барьерная составляющая емкости диода стремится к  $\infty$  при  $V \rightarrow \Phi_0$ . Предлагается взять касательное продолжение начиная с точки  $F_c * \Phi_0$  (рис. 6). Обычно  $F_c = 0.5$ . Эквивалентная схема полученной глобальной модели показана на рис. 7.

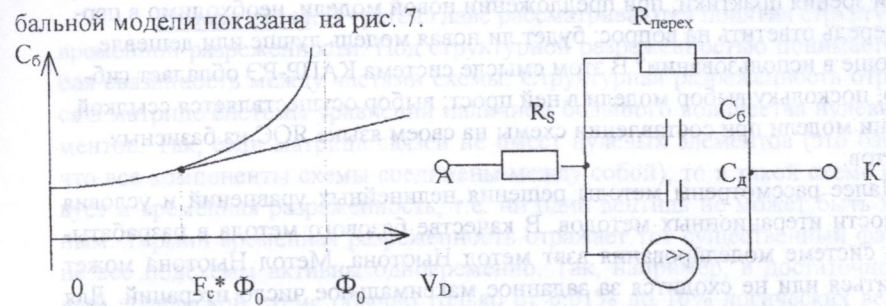


Рис. 6.

Рис. 7.

Что касается построения модели транзистора, то применяется макромодель с использованием более простых элементов, в том числе и диода, которая учитывала бы с определенной точностью основные процессы, происходящие в транзисторе. Далее введением новых параметров в модель добиваются повышения ее точности.

Для обоих типов транзистора (ррп и рпр) выполняются закон токов Кирхгофа и закон напряжений Кирхгофа:  $I_E + I_B + I_C = 0$ ,  $V_{EB} + V_{BC} + V_{CK} = 0$ , (токи и напряжения на эмиттере, базе и коллекторе соответственно). Наиболее распространенной моделью является модель Эберса-Молла, эквивалентная схема которой показана на рис. 8. Основные уравнения модели:  $I_F = I_{FS} (\exp(V_{BE}/\phi) - 1)$ ;  $I_R = I_{CS} (\exp(V_{BC}/\phi) - 1)$ ,  $\alpha_F * I_{FS} = \alpha_R I_{CS} \equiv I_S$ . Полученные значения на компьютере исходя из этой модели хорошо совпадают с экспериментальными характеристиками, что свидетельствует об адекватности этой модели.

Выбор той или иной модели определяется следующими факторами:

- 1) достаточно полное отражение физических процессов;
- 2) простота способа получения необходимых данных для этой модели;



- 3) легкость учета теплового рассеяния;
- 4) удовлетворимость модели по опыту прошлого;
- 5) простота модели в смысле вычисления.

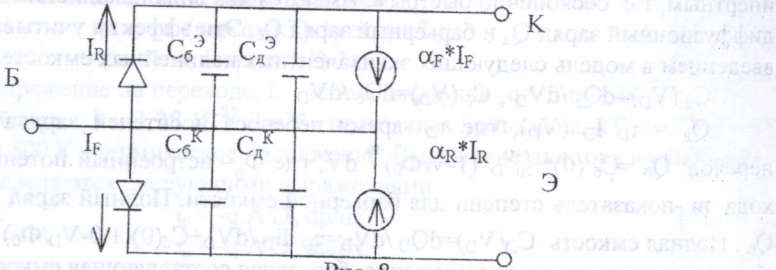


Рис. 8.

Так как эти требования взаимно противоречивы, то на практике разрешается компромисс между ними для конкретного случая применения модели. С точки зрения практики, при предложении новой модели, необходимо в первую очередь ответить на вопрос: будет ли новая модель лучше или дешевле, или проще в использовании? В этом смысле система КАПР-РЭ обладает гибкостью, поскольку выбор модели в ней прост; выбор осуществляется ссылкой по имени модели при составлении схемы на своем языке ЯОС из базисных элементов.

Далее рассмотрены методы решения нелинейных уравнений и условия сходимости итерационных методов. В качестве базового метода в разрабатываемой системе моделирования взят метод Ньютона. Метод Ньютона может расходиться или не сходиться за заданное максимальное число итераций. Для преодоления этой трудности предлагается так называемый «принцип малых возмущений» схемы, который заключается в следующем.

При расчете схемы обычно заданы начальные условия. Если они не заданы, то их вычисляем следующим образом. Отключаем все источники питания и все входные воздействия схемы. После этого в качестве начальных значений неизвестных возьмем нулевые значения. С физической точки зрения ясно, что это является решением системы уравнений. На следующем этапе подадим "небольшое" возбуждение схеме и снова, решив систему уравнений, найдем ее состояние. И так дальше до достижения заданных в исходной задаче значений питания и входных возбуждающих сигналов. Таким образом, мы находим начальные условия для расчета схемы. Поскольку мы двигаемся, исходя из точного (нулевого) решения, с небольшими наращиваниями возбуждающих сигналов (следовательно, для реальной физической схемы малыми изменениями решения), то итерации Ньютона заведомо будут сходиться на каждом этапе продвижения к искомым начальным условиям. Последнее утверждение основывается на том факте, что метод Ньютона обладает локальной сходимостью и для малых возмущений на каждом шаге можно гарантировать глобальную сходимость решения задачи статики, если система уравнений непре-

рывно дифференцируема на интервале изменений возбуждающих схему параметров. При таком подходе на каждом шаге фактически решается частная задача статики, что дает возможность легко определить статические передаточные характеристики рассчитываемой схемы. Следует сказать, что принцип малых возмущений применим в каждой временной точке при решении задачи динамики.

Далее рассмотрены методы разрешения проблемы переопределения, связанные с нелинейными характеристиками элементов цепи. Это - прежде всего такие нелинейности, как экспоненциальные характеристики рп-переходов в полупроводниковых приборах. В итерациях Ньютона при превышении напряжений на экспоненциальных характеристиках некоторых критических значений предлагается ввести «логарифмическое ограничение» шага, которое можно рассматривать как модификацию метода Ньютона. Рассмотренные методы пригодны и для других гладких нелинейных характеристик.

**Третья глава.** В третьей главе рассматриваются понятия структурной и временной разреженности. Под структурной разреженностью понимается слабая связанность между частями схемы. Структурная разреженность отражается в матрице системы уравнений наличием большого количества нулевых элементов. Так, если матрица связей не имеет нулевых элементов (это означает, что все компоненты схемы соединены между собой), то в такой схеме отсутствует и временная разреженность, т.е. ни один вентиль не может быть латентным. Термин временная разреженность отражает тот существенный факт, что не все подсхемы активны одновременно. Так, например, в достаточно большой логической схеме обычно только от 0.01% до 10% логических вентиляей активны в один и тот же момент времени.

Рассмотрены применение разреженных методов решений уравнений и представления данных, так как предлагаемые методы формирования уравнений дают сильно разреженные матрицы, причем разреженность усиливается с ростом размера схемы как функция  $1/N$ , где  $N$  - число неизвестных переменных. Для узла разреженность строки уравнения ЗТК равна  $k/N$ , где  $k$  - валентность узла (как правило,  $k=2..4$ ). Итак, мы видим, что при больших размерах системы, разреженность матрицы сильная. Так, для схемы типичной структуры (среднее число выводов элемента равно 3, например, транзистор) при  $N>400$  заочленность менее 1%.

Значительное повышение эффективности связано с учетом латентности, т.е. различной активности изменения переменных. Предлагается эффективный метод разбиения переменных системы уравнений на активные и пассивные. Новые значения для пассивных переменных получают путем прогноза на основе предыдущих значений. Латентность при этом означает не только учет неактивных участков цепи, но и учет относительного разделения переменных на "быстрые" и "медленные". В цепи часто выделяется лишь небольшая группа "быстрых" переменных. Все остальные переменные рассматриваются как ла-



тенные. Идея состоит в интегрировании уравнений только для активных переменных, а значения пассивных переменных экстраполируются недорогогими в вычислительном смысле формулами прогноза. Основная суть предложенного алгоритма состоит в следующем.

Выражение ошибки усечения для точки  $t = t_n$  можно записать так:

$$e_T = |C_k * x^{(k+1)}(\tau) * h_n^{k+1} \text{ или } e_T = C' * h_n^2 \text{ при } k = 1, \quad (9)$$

где  $C'$  — некоторая константа, не зависящая от шага  $h$ .

Для оценки этой ошибки используется следующее выражение:

$$e_T = \{h_n / (h_n + h_{n-1})\} * (x_n - x_n^0), \quad (10)$$

где  $x_n^0$  — прогнозируемое значение,  $x_n$  — скорректированное значение.

**Определение 1.** Интенсивностью ошибки назовем отношение ошибки, накопленной на некотором интервале времени, к длине этого  $\Delta$  при условии, что шаг изменился незначительно интервала.

Зададимся следующим вопросом. Как изменится интенсивность ошибки усечения для данной переменной, если в итерации по времени сделать шаг только на основе прогноза (то есть не делая коррекцию). Другими словами, какова ошибка  $e'$ , если вместо скорректированного значения переменной взять ее спрогнозированное значение. Пусть  $e' = K_\eta * e$ , где  $K_\eta$  — константа связи. Найдем  $K_\eta$ .

$e' = e + \Delta/h_n$ , где  $\Delta = x_n - x_n^0$  ( $\Delta/h_n$  — добавочная интенсивность ошибки). Таким образом,  $e' = e + (x_n - x_n^0)/h_n = 1/(h_n + h_{n-1}) * (x_n - x_n^0) + 1/h_n * (x_n - x_n^0) = (1/(h_n + h_{n-1}) + 1/h_n) * (x_n - x_n^0)$ . Отсюда  $K_\eta = e'/e = (1/(h_n + h_{n-1}) + 1/h_n) / (1/h_n) = 2 + h_{n-1}/h_n \leq 3$ , т.е.  $K_\eta^* = 3$  при условии, что не происходит резкого уменьшения шага.  $K$  назовем граничным значением запаса латентности. Таким образом, чтобы интенсивность ошибки сохранялась на заранее заданном уровне, необходимо уменьшить шаг  $h$ . Поскольку для неявного метода Эйлера (порядок метода  $k=1$ ) интенсивность ошибки зависит от  $h$  линейно, то надобно уменьшит шаг в три раза. Тогда, вместо того, чтобы сделать шаг  $h_j$  для переменной  $x_j$  на основе прогноза-коррекции, можно сделать шаг  $h_j/3$  на основе только прогноза.

В алгоритме выбора шага значения нового и старого шагов связаны следующим соотношением:  $h^{new} = \eta_{min} * h^{old}$ , где  $\eta_{min}$  есть минимальное значение среди  $\eta_j$ , соответствующих переменным схемы  $x_j$ ,  $j = 1..n$ .

Пусть  $h_j^{new}$  и  $K_\eta^j$  следующим образом:  $h_j^{new} = \eta_j * h^{old}$ ,  $K_\eta^j = \eta_j / \eta_{min}$ .

**Определение 2.** Коэффициент  $K_\eta^j$  назовем запасом латентности для переменной  $x_j$ . **Определение 3.** Переменную назовем пассивной в момент времени  $t = t_n$ , если  $K_\eta^j > K_\eta^*$ , и активной в противном случае.

На рис. 9 длина отрезка равна возможному шагу для переменной  $x_j$  ( $j = 1..n$ ) в точке  $t = t_n$ . Минимальный отрезок, соответствующий переменной  $x_j$  ( $j=1..n$ ), определяет новый шаг  $h^{new}$ . Если  $h^{new} > K_\eta^* h^{new}$  (или  $\eta_j > K_\eta^* \eta_{min}$ ), где  $K_\eta^* = 3$ , то переменная  $x_j$  заносится в класс пассивных и для

нее определяется момент активизации  $t_{akt}^j = t_n + h_j^{new} / K_\eta^*$ . Далее значения пассивной переменной до момента  $t_{akt}^j$  определяются только на основе прогноза.

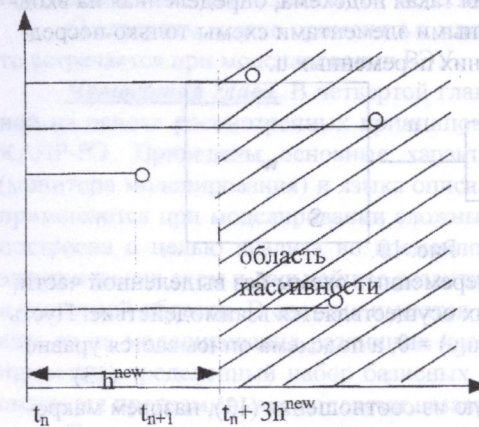


Рис. 9.

Особенностью предложенного алгоритма является то, что в нем для анализа переменных на активность используется информация, которая уже получена при определении величины нового шага интегрирования (т.е. величины шага на следующей итерации по времени). Пассивизируются те переменные, которые допускают "достаточно" большое увеличение шага по времени для следующей итерации. Переменная пассивна до момента активизации, который определяется на основе величины ошибки усечения формулы интегрирования, получаемой также при вычислении нового шага.

Характерной чертой РЭУ является то, что они часто состояются не из одиночных полупроводниковых элементов, рассмотренных выше, а из стандартных функциональных блоков. Функциональный блок состоит из множества простых элементов и служит для выполнения определенных функций. Примерами функциональных блоков являются операционные усилители (ОУ), модуляторы, логические элементы и т.д. Так, типичный ОУ содержит до 30 транзисторов, а также резисторы и конденсаторы. Использование модели Гуммеля-Пуна для каждого транзистора при описании ОУ приведет к большой размерности системы уравнений. Если цепь состоит из множества ОУ, то можно столкнуться с проблемой большой размерности. Другая трудность подробной модели состоит в отсутствии доступа проектировщика к внутренней структуре усилителей и параметрам транзисторов.

Макромодели достаточно точно характеризуют поведение функционального блока относительно его выводов. Макромодели можно составить на основе внешних характеристик устройства, результатов измерений и данных завода-изготовителя.



Предлагается следующий метод топологической декомпозиции на основе использования и выделений макромоделей. Выделим в рассматриваемой схеме  $S$  подсхему  $S1$  (рис. 10). Каждая такая подсхема, определенная на входном языке, взаимодействует с остальными элементами схемы только посредством небольшого числа своих внешних переменных  $u$ .

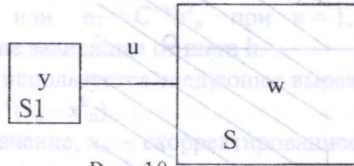


Рис. 10.

где  $y$  – переменные подсхемы;  $w$  – переменные схемы без выделенной части;  $u$  – переменные, посредством которых осуществляется взаимодействие. Пусть схема описывается уравнением  $F(w, u, y) = 0$ , а подсхема описывается уравнением  $f(y, u) = 0$ .

Функцию  $y = g(u)$ , определяемую из соотношения (13), назовем макромоделью подсхемы. Тогда можно записать так:  $F(w, u, g(u)) = 0$  (14)

Для решения последнего воспользуемся методом НР:

$$F + D_w F \Delta w + D_u F \Delta u + D_g F \Delta g \Delta u = 0 \quad (15)$$

Функция  $g$  неявно связана с соотношением (13). Для ее оценки также применим метод НР, считая  $u$  фиксированным (она определяется из (14)), т.е.

$$f + D_y f \Delta y = 0 \quad (16)$$

Если система (13) решена точно, то погрешность оценки макромоделей и ее производной  $D_g$  равна нулю, поэтому использование их в (15) приводит к итерационному процессу Ньютона с локальной квадратичной сходимостью. Однако, если макромоделей и ее производная точно не определены, вопрос о квадратичной сходимости остается открытым. Предлагается подход, состоящий в сохранении локальной квадратичной сходимости итераций при наличии погрешности в промежуточных вычислениях. Может оказаться, что не имеет смысла решать (13) с точностью, превышающей точность текущей итерации решения уравнений (14), а лишь необходимо поддерживать сходимость итерации (16) на том же уровне, что и скорость сходимости итерации (15). Условием окончания итерационного процесса будет выполнение неравенства  $|\Delta y| \leq |\Delta u, \Delta w|^2$ . Этот алгоритм обладает локальной квадратичной сходимостью. Можно показать, что, если принять иной критерий окончания итерационного процесса (16), например такой  $|\Delta y| \leq |\Delta u, \Delta w|$ , то алгоритм будет сходиться, но квадратичный характер сходимости теряется. Как и другие методы декомпозиции, этот алгоритм допускает параллельную работу с моделями отдельных подсхем.

Рассмотренный метод имеет два других важных преимущества:

а) если существуют идентичные подсхемы, то решение линейного уравнения на каждом шаге итерации (16) может быть получено для любой такой подсхемы с помощью одних и тех же LU-множителей;

б) алгоритм можно применять к многоуровневой иерархии, которая часто встречается при моделировании РЭУ.

**Четвертая глава.** В четвертой главе описана характеристика построенной на основе рассмотренных принципов и методов системы моделирования КАПР-РЭ. Приведены основные характеристики управляющей программы (монитора моделирования) и языка описаний схем и элементов ЯОС, которые применяются при моделировании сложных динамических объектов. КАПР-РЭ построена с целью анализа во временной области линейных и нелинейных электрических схем и дальнейшее развитие системы должно охватить анализ и в частотной области. В системе имеются средства, позволяющие перенастраивать ее на моделирование различных классов РЭУ, где под классом РЭУ понимается определенный набор базисных элементов. Базисные элементы описываются программными моделями независимо друг от друга.

Проведены расчеты тестовых схем примеры с целью иллюстрации функционирования системы моделирования радиоэлектронных устройств и, тем самым, работу предложенных методов и алгоритмов.

На графике 1 показан результат расчета схемы 1; кривая состоит из суммы вынужденных и свободных колебаний. Особенность этого теста заключается в том, что сопротивление  $R$  мало, поэтому свободные колебания затухают очень медленно. На графике 2 результаты счета той же схемы, но с параметрами, близкими к резонансному. На график выведены три кривые: входной синусоидальный сигнал, ток в цепи и напряжение на катушке индуктивности. На графике 3 то же, что и в предыдущем случае, но просчитан с большой точностью начальный этап переходного процесса. График 4 иллюстрирует потерю точности при попытке задать большой шаг интегрирования в режиме жесткого задания шага пользователем (блокирование автоматического выбора шага). Однако, как видно из графика сходимость есть, поскольку схема линейная и метод интегрирования является неявным. На графике 5 показана возможность получения свободных колебаний путем задания начального значения переменным системы уравнений (в данном случае, току цепи). На следующем графике 6 то же, однако, полученный на следующем этапе счета для последующего интервала времени, причем сохраненные результаты предыдущего счета были взяты в качестве начальных значений (см. схему 5). На графике 7 показаны результаты счета схемы 7 для идеальной модели диода. В начальный момент времени включается напряжение 5 В. Кривые: А – ток в цепи; В – разность потенциалов на катушке; С – разность потенциалов на конденсаторе. Амплитуда тока  $I = E \cdot C = 5 \cdot 2 = 10$  (на графике она равна 9.896, т.к. точность счета был задан равным 1%). Конечное напряжение на конденсаторе  $U = 2 \cdot E = 2 \cdot 5 = 10$ , что согласуется с теоретическим значением. Это можно вывес-



ти из закона сохранения энергии:  $C*U*U/2 = E*Q = E*U*C$ , отсюда  $U = 2*E$ . На следующем графике 8 то же для схемы с реальным диодом. На графике видно падение напряжения на диоде как разность между кривыми В и С (напряжения на катушке и конденсаторе). Скачок напряжения на катушке происходит из-за диода, который не пропускает ток в обратном направлении. На графиках 9 и 10 показаны результаты расчета однокаскадного транзисторного усилителя (схема 9). На графике 11 результаты расчета усилителя мощности (схема 11).

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обоснованы принципы построения гибкой и эффективной системы схемотехнического моделирования. Это прежде всего принцип объектно-ориентированного программирования, который обуславливает компактность и гибкость системы, суть которого состоит в обеспечении доступа многих функций к общим структурам данных в условиях отсутствия информации о деталях реализации этих структур или явного обмена данными между ними. Это позволяет строить целые сборки программных модулей при незначительном объеме специальной программы, обеспечивающей их соединение. Второй принцип, взятый в основе предлагаемой системы моделирования, – принцип блочно-компонентной структурности исследуемых объектов. Это принцип обуславливает такие свойства системы, как эффективность в смысле быстродействия и гибкость в смысле перенастраиваемости на различные классы моделей базисных элементов. Эффективность при этом достигается за счет фиксации набора базисных элементов, так как при этом компонентные уравнения элементов сводятся к наиболее удобному для интегрирования виду с учетом применяемого метода интегрирования.

2. Осуществлен выбор методов дискретизации и численного интегрирования на основе предложенной классификации и анализа существующих методов.

3. Для решения нелинейных уравнений предложен метод Ньютона с модификацией для учета экспоненциальной характеристики рп-перехода.

4. Предложен упрощенный и эффективный алгоритм формирования системы уравнений модели. Этот процесс по сути сведен к построению уравнений дискретизированной математической модели схемы в удобном для используемой процедуры решения виде.

5. Предложенный алгоритм моделирования дает следующие преимущества:

- простые правила формирования уравнений модели схемы;
- сразу определяется структура матрицы решаемой системы уравнений в разреженном виде;
- возможность применения современных методов обработки больших разреженных систем линейных алгебраических уравнений;
- возможность совмещения анализа схем в статическом и динамическом режимах.

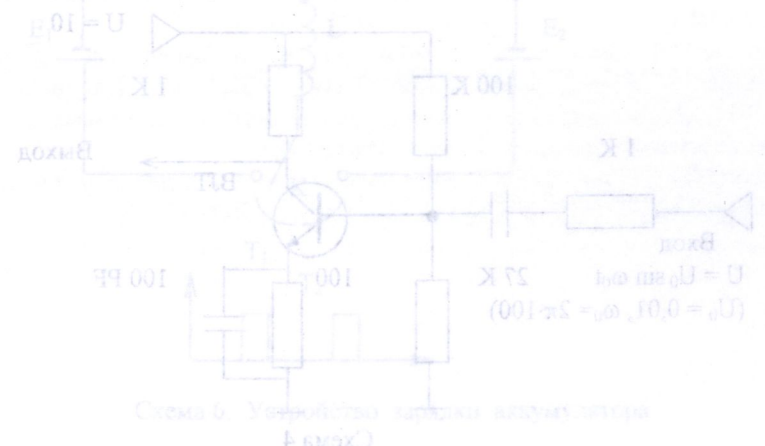
6. Алгоритмически и программно реализован автоматический выбор оптимального шага интегрирования на основе жестко устойчивого метода. Самонастройка неявных методов интегрирования по характеру динамических процессов, происходящих в моделируемой схеме, позволяет преодолеть “барьер постоянной времени”.

7. Программно реализованы алгоритмы формирования, хранения и решения систем уравнений модели разреженными методами.

8. Предложен алгоритм учета латентности. Он состоит в анализе переменных модели на активность и исключении латентных (очень медленных) переменных из системы уравнений до момента их активизации. При этом для анализа переменных на активность используется информация, которая уже получена при выборе оптимального шага интегрирования.

9. На основе предложенных принципов и алгоритмов построена система схемотехнического моделирования КАПР-РЭ (Комплекс программ автоматизации проектирования радиоэлектронных устройств). Моделирование тестовых схем показало работоспособность системы.

10. Программная система КАПР-РЭ позволяет моделировать электрические схемы любого вида, вне зависимости от характеристик элементов и способов их соединения. При этом существенным отличием КАПР-РЭ от широко распространенных программ схемотехнического анализа типа SPICE состоит в том, что в этой системе не используются топологические методы (теория графов); в ней система уравнений модели формируется сразу в дискретизированном и линеаризованном виде на основе описанных заранее базисных элементов.





ТЕСТОВЫЕ СХЕМЫ

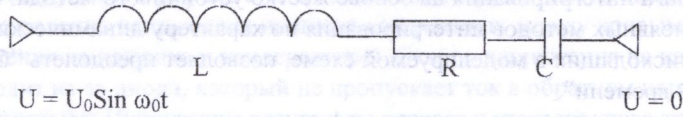


Схема 1.

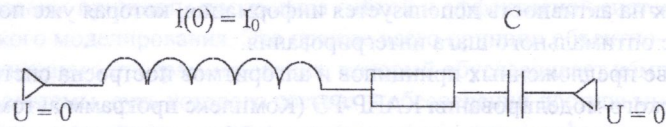


Схема 2.

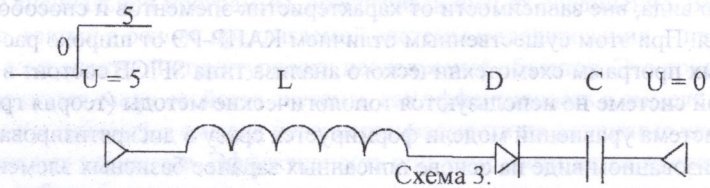


Схема 3.

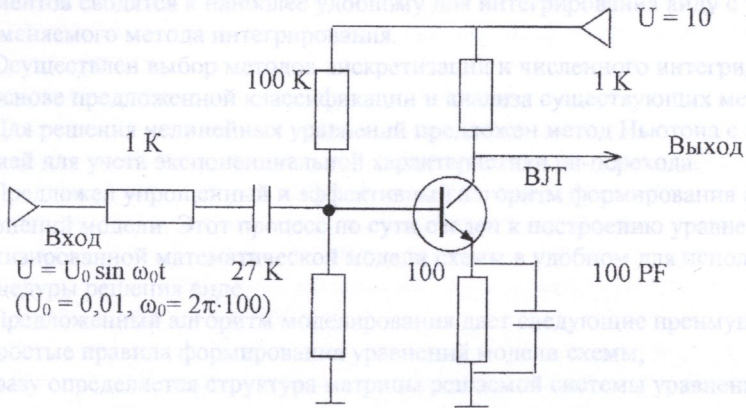


Схема 4

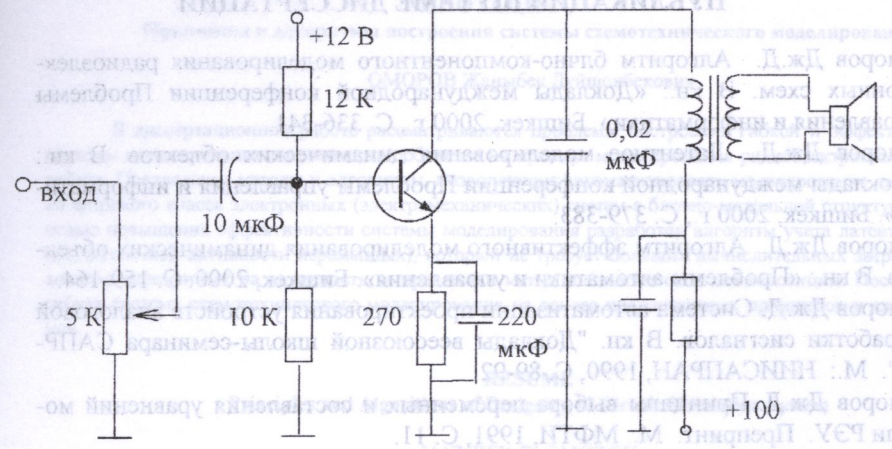


Схема 5. Усилитель мощности с трансформаторным выходом

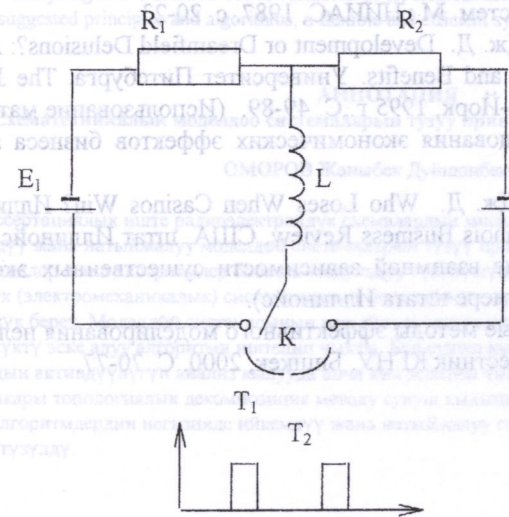


Схема 6. Устройство зарядки аккумулятора



## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Оморов Дж.Д. Алгоритм блочно-компонентного моделирования радиоэлектронных схем. В кн.: «Доклады международной конференции Проблемы управления и информатики». Бишкек, 2000 г., С. 336-341.
2. Оморов Дж.Д. Латентное моделирование динамических объектов. В кн.: «Доклады международной конференции Проблемы управления и информатики». Бишкек, 2000 г., С. 379-383.
3. Оморов Дж.Д. Алгоритм эффективного моделирования динамических объектов. В кн.: «Проблемы автоматизации и управления». Бишкек, 2000. С. 159-164.
4. Оморов Дж.Д. Система автоматизации проектирования устройств аналоговой обработки сигналов. В кн. "Доклады всесоюзной школы-семинара САПР-90". М.: НИИСАПРАН, 1990, С. 89-92.
5. Оморов Дж.Д. Принципы выбора переменных и составления уравнений модели РЭУ. Препринт. М.: МФТИ, 1991, С. 11.
6. Оморов Дж.Д. Проблемы переполнения и расхождения при численном моделировании полупроводниковых элементов. В кн.: "Моделирование процессов обработки информации и управления". М.: МФТИ, 1990. С. 160-165.
7. Оморов Дж.Д. Применение методов частотной обработки для анализа переходных процессов в нелинейных автоматических системах. В кн.: Труды НИИ автоматических систем. М.: НИИАС, 1987. с. 20-23.
8. Гринолс Э.Л., Оморов Дж. Д. Development or Dreamfield Delusions?: Assessing Casino Gambling's Costs and Benefits. Университет Питсбурга. The Journal of Law and Commerce, Нью-Йорк, 1995 г., С. 49-89. (Использование математической модели для исследования экономических эффектов бизнеса азартных игр в США).
9. Гринолс Э.Л., Оморов Дж. Д. Who Loses When Casinos Win? Иллинойский университет, Журнал Illinois Business Review. США, штат Иллинойс, 1996 г., С. 7-11. (Моделирование взаимной зависимости существенных экономических переменных на примере штата Иллинойс).
10. Оморов Дж.Д. Численные методы эффективного моделирования нелинейных динамических систем. Вестник КГНУ. Бишкек, 2000. С. 70-77.



## АННОТАЦИЯ

Принципы и алгоритмы построения системы схемотехнического моделирования

ОМОРОВ Жаныбек Дуйшонбекович

В диссертационной работе рассматриваются проблемы построения гибкой и эффективной системы моделирования динамических объектов на примере моделирования радиоэлектронных устройств. Предложены методы и алгоритмы, позволяющие автоматизировать моделирование динамики широкого класса электронных (электромеханических) систем с блочно-модульной структурой. С целью повышения эффективности системы моделирования разработан алгоритм учета латентности (т.е. различной активности переменных), который не требует больших вычислительных затрат для анализа переменных на активность, и предложен метод топологической декомпозиции. Построена гибкая система схемотехнического моделирования на основе предложенных принципов и алгоритмов.

## RESUME

Principles and Algorithms of Designing of Circuit Simulation System

JANYBEK D. OMOROV

This work discusses problems of developing flexible and efficient systems of modeling of dynamic objects in case of radio electronic circuits. Proposed methods and algorithms allow to model dynamics of wide range of electronic (electro-mechanical) systems that have a block structure. In order to increase efficiency of the modeling system, algorithm of latency is suggested. This algorithm does not require costly calculations for analyzing active and non-active variables. A topological decomposing method is suggested. On the base of suggested principles and algorithms, a flexible and efficient system of modeling of circuits is developed.

## АННОТАЦИЯ

Схемотехникалык моделдөө системаларын түзүү принциптери жана алгоритмдери

ОМОРОВ Жаныбек Дуйшонбекович

Диссертациялык иште радиоэлектрондук схемалардын мисалында динамикалык объектердин ийкемдүү жана натыйжалуу моделдөө системаларын түзүү проблемалары каралат. Сунуш этилген методдор жана алгоритмдер блоктук-модульдуу түзүлүшүндөгү кеңири класстагы электрондук (электромеханикалык) системалардын моделдөөсүн автоматташтырганга мүмкүнчүлүк берет. Моделдөө системасынын натыйжалуулугун жогорулатуу максатында латенттүүлүктү эске алуу алгоритми иштелип чыкты. Бул сунуш кылынган алгоритм өзгөрүү чоңдуктардын активдүүлүгүн анализ кылууда анча көп эсептөө чыгымдарын талап кылбайт. Андан тышкары топологиялык декомпозиция методу сунуш кылынды. Сунуш этилген принциптердин жана алгоритмдердин негизинде ийкемдүү жана натыйжалуу схемотехникалык моделдөө системасы түзүлдү.