

УДК 004.94

В. Н. Гридин

*Центр информационных технологий в проектировании РАН*В. И. Анисимов, Г. Д. Дмитриевич, М. А. Аль-Ноумани Саид*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

Оптимизация статического режима радиоэлектронных схем

Рассматриваются вопросы построения открытых САПР радиоэлектронных схем. Представлено решение задачи оптимизации характеристик радиоэлектронных схем с использованием математических моделей схем, адаптирующихся к специфическим особенностям проектируемой схемы. Рассматривается стратегия поиска оптимальных проектных решений, базирующаяся на многошаговой схеме многокритериальной оптимизации. Предлагается подсистема оптимизации статического режима радиоэлектронных схем. Универсальные инструментальные средства САПР открыты как к новым элементам математического обеспечения, так и к новым технологиям и предметным областям. Устраняются основные недостатки универсальных систем схемотехнического проектирования: усложненный алгоритм задания варьируемых параметров и целевых функций; ограниченный набор алгоритмов оптимизации; закрытость подсистемы оптимизации для подключения внешней библиотеки методов оптимизации.

Радиоэлектронная схема, метод гибкого координатного базиса, математическая модель схем, автоматизация схемотехнического проектирования, векторная оптимизация, система оптимального проектирования

В современных условиях интенсивного развития науки и техники немаловажное значение приобретает вопрос адаптации программного обеспечения к быстроизменяющимся требованиям. Это связано с тем, что изменение технологий промышленного производства и развитие математического обеспечения происходят обычно более быстрыми темпами, чем может создаваться программное обеспечение новых САПР [1]–[5]. Для замедления морального старения программного обеспечения (ПО) САПР необходимо создать универсальные инструментальные средства САПР, открытые как к новым элементам математического обеспечения, так и к новым технологиям и предметным областям. Широко предлагаемые на рынке зарубежные системы схемотехнического проектирования Altium Designer, Micro-Cap, Electronics Workbench и др. [6]–[13] не позволяют организовать эффективное взаимодействие поль-

зователей в процессе постановки и при решении задач параметрической оптимизации радиоэлектронных схем. К основным недостаткам зарубежных систем следует отнести:

- усложненный алгоритм задания варьируемых параметров и целевых функций;
- ограниченный набор алгоритмов оптимизации;
- закрытость подсистемы оптимизации для подключения внешней библиотеки методов оптимизации.

В статье рассматриваются вопросы построения подсистемы оптимизации статического режима в составе открытой диалоговой системы оптимального схемотехнического проектирования (ДИСП) [1]. Задача анализа нулевого уровня радиоэлектронных схем решается на основе формирования и адаптации математических моделей схем, учитывающих специфику проектируемых схем.

Архитектура программного обеспечения. Архитектура системы, в самом общем виде представленная на рис. 1, содержит инвариантную обслуживающую и проблемно-ориентированные части. Инвариантная обслуживающая подсистема обеспечивает единообразное выполнение всех сервисных функций предварительной обработки

информации, а также хранение и модификацию данных, необходимых в процессе функционирования системы [13].

Подсистема содержит такие программные комплексы, как транслятор с входного языка системы, редактор диалогового типа, программы документирования описаний объекта исследова-

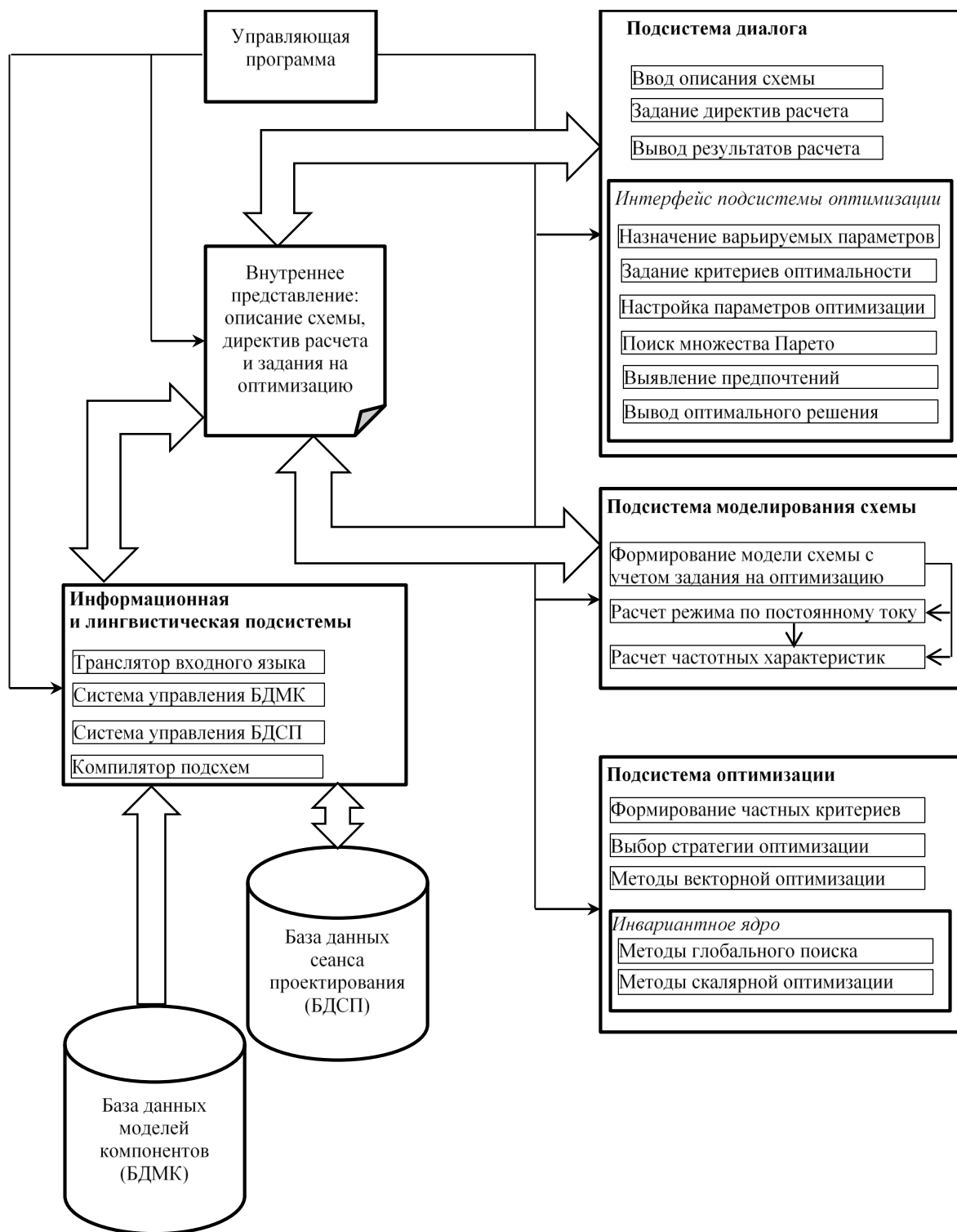


Рис. 1

ний, специализированная база данных параметров моделей компонентов (БДПК), и систему управления данными. Инструментальные программные средства обеспечивают стыковку проблемно-ориентированных пакетов программ с внутренними структурами данных с целью реализации принципа расширяемости, быстрой адаптации к новым предметным областям.

Проблемно-ориентированные подсистемы анализа и оптимизации строятся в виде автономных диалоговых программ модульной структуры. Управляющие вызовы через интерфейсы компонентов представлены на рисунке линиями со стрелками. Информационные потоки представлены двойными линиями. База данных сеанса про-

ектирования (БДСП) хранится в виде отдельных файлов на диске. Использование такого подхода позволило значительно упростить работу с проектом не только на отдельных рабочих станциях, но и обеспечить возможность групповой соразработки проекта с требуемым разграничением прав доступа отдельных участников рабочей группы. Обобщенная структурная схема подсистемы оптимизации, ориентированная на работу в Интернете, показана на рис. 2.

Подсистема имеет клиент-серверную архитектуру и состоит из двух частей: клиентской и серверной. Серверная часть предназначена для выполнения серии вычислений характеристик проектируемой схемы в соответствии с варианта-

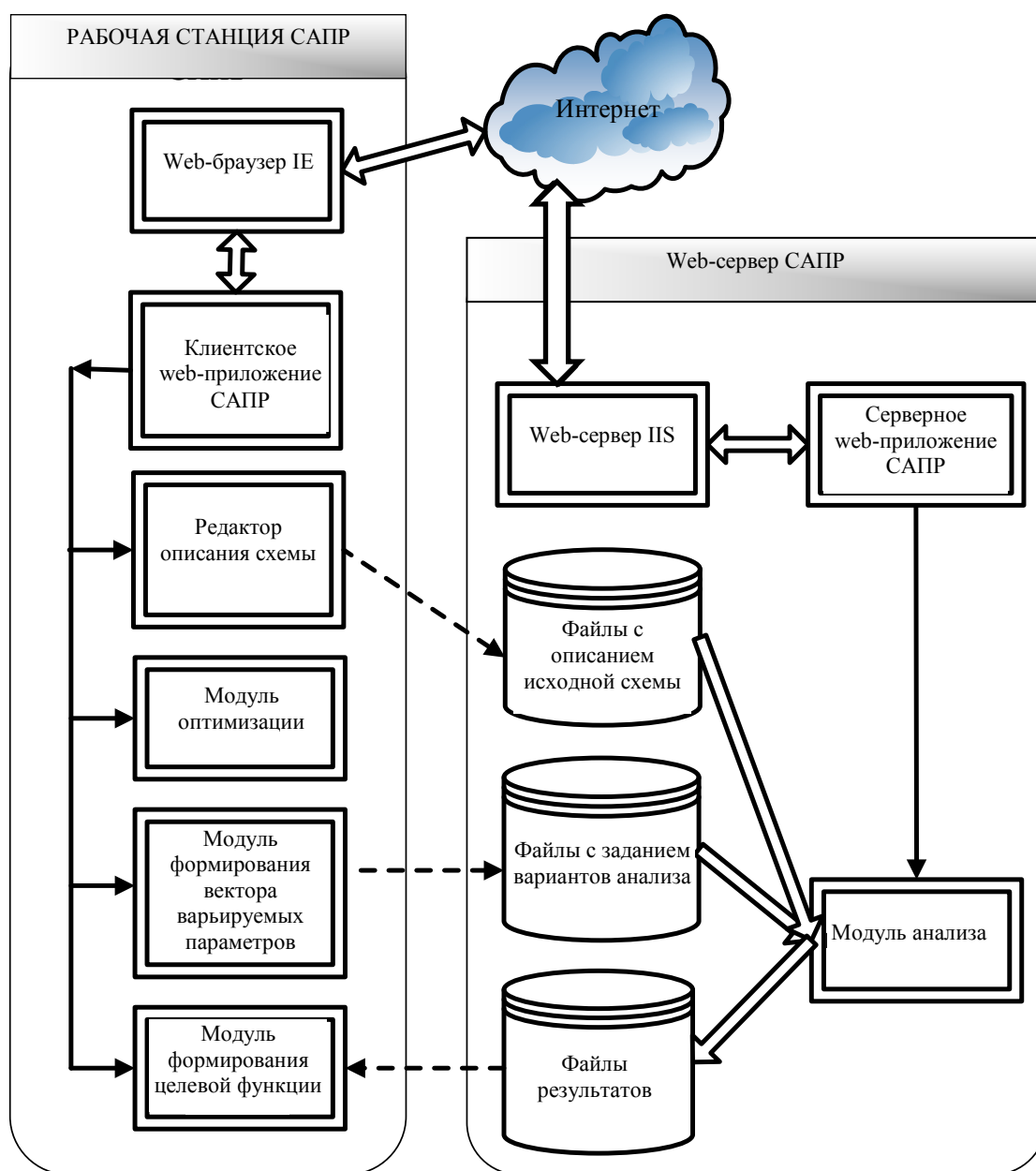


Рис. 2

ми вектора варьируемых параметров. Клиентская составляющая подсистемы обеспечивает основные проектные операции, направленные на получение оптимального проектного решения. К таким операциям относятся: формирование описания исходного варианта схемы; задание начального вектора варьируемых параметров; вычисление функции качества (целевой функции); формирование текущего вектора варьируемых параметров в соответствии с используемым алгоритмом оптимизации.

В состав системы входят следующие компоненты:

Управляющая интерфейсная подсистема, предназначенная для управления процессом выполнения всех проектных операций в процессе оптимизации схемы. В ее функции входит вызов всех модулей системы и пересылка файлов с данными между клиентом и сервером. Подсистема реализована в виде распределенного web-приложения, включающего клиентскую и серверную составляющие САПР.

Редактор описания схемы, служащий для ввода описания проектируемой схемы (именно из этой подсистемы необходим доступ к web-серверу интернет-ресурсов).

Подсистема векторной оптимизации. Сравнительный анализ достоинств и недостатков методов на основе линейных и нелинейных сверток и методов поиска непосредственно на множестве допустимых решений диктует необходимость их комплексного использования в составе библиотеки алгоритмов подсистемы векторной оптимизации, включающей в себя: диалоговый алгоритм на основе зондирования пространства параметров точками LP_T -последовательности; минимаксный алгоритм; группу скалярных алгоритмов 0-го и 1-го порядков; векторно-релаксационный алгоритм [4].

Схематехническая окраска задач оптимального проектирования отражена в виде многочисленных модификаций алгоритмов оптимизации. Так, в алгоритм LP_T -поиска предложено включить: предварительную оценку решения по минимаксу; назначение критериальных ограничений с последующим выделением множества наилучших решений; назначения параметрических ограничений при использовании многошаговой схемы; программный учет простых функциональных ограничений-равенств (ограничений связи); механизм фиксации компонент вектора варьируемых параметров без изменения общей постановки задачи и модификации сформированной в машине модели оптимизации; логарифмическое

преобразование границ вариации параметров. Аналогичные модификации, направленные на повышение качества работы алгоритмов и диалогового управления их функционированием со стороны схмотехника, введены во все алгоритмы библиотеки подсистемы.

Стратегия поиска оптимальных проектных решений базируется на многошаговой схеме и использует характерные особенности различных групп алгоритмов векторной оптимизации. На первом шаге осуществляется двух-трехкратное зондирование параметров с оценкой минимаксного решения и постепенным сокращением области поиска решений. Свертывание векторного критерия в скалярный для работы алгоритмов осуществляется с использованием аддитивной функции. Весовые коэффициенты в свертке могут быть заданы пользователем. Результатом первого шага является выбранное проектировщиком опорное решение, которое на втором шаге уточняется одно-двухкратным применением одного из скалярных алгоритмов с использованием свертки. Выбор и уточнение решения на третьем шаге осуществляются с помощью векторно-релаксационного алгоритма. На любом шаге возможно окончание работы с подсистемой, а также возврат на любой из предыдущих шагов. В состав математического обеспечения системы ДИСП включены оригинальные модификации методов нелинейного программирования нулевого и первого порядков. Для получения оценки глобального решения применяются монотонный алгоритм глобального поиска и алгоритм генетического поиска [4].

Практика применения предложенной стратегии показала, что хороших результатов можно достичь, запуская последовательно монотонный алгоритм глобального поиска и алгоритм интуитивного поиска. На первом этапе требуется, как правило, 50–100 вычислений функции качества, чтобы локализовать глобальный экстремум. Несколько большее число вычислений (200–250) требуется для уточнения решения. Однако этот показатель в несколько раз ниже в случае однократного применения алгоритма интуитивного поиска. Алгоритм генетического поиска можно использовать как для оценки глобального экстремума, так и для уточнения решения, полученного монотонным алгоритмом глобального поиска. Для отыскания точных решений используются модификации локальных алгоритмов и алгоритм интуитивного поиска В. О. Эгглайса, что позволяет уменьшить время поиска и повысить надежность получения качественного проектного решения.

Подсистема оптимизации нулевого уровня (НУ) РЭС. Оптимизация НУ нелинейных электронных схем является одной из наиболее важных задач автоматизированного схемотехнического проектирования. Правильный выбор режимов активных компонентов определяет отчасти все остальные характеристики проектируемых устройств – временные, частотные, дрейфовые и др. Ниже представлен подход к оптимизации НУ схем, учитывающий схемотехническую окраску решаемой задачи.

Стремление к сочетанию таких свойств математической модели схем (ММС), как простота ее формирования, возможно меньшая размерность, универсальность, проблемная адаптация, нашло в настоящее время свое отражение в возврате к квазилучевым базисам на новом уровне обобщения, определяемом устранением ограничений на характер переменных компонентов (модифицированный метод узловых напряжений, обобщенный узловой координатный базис, адаптивные модели с искусственной инерционностью, асимптотические адаптивные модели). Слабой стороной указанных методов является сохраняющаяся опасность плохой обусловленности матрицы Якоби, которая оказывается скорее правилом, чем исключением.

Можно существенно ускорить сходимость итерационного процесса и снять ограничение, накладываемое на выбор начального приближения, если ввести в рассмотрение гибкий (корректирующийся в ходе счета) координатный базис (ГКБ). Он адаптируется к характеру нелинейных зависимостей многополюсных элементов анализируемой схемы и отличается от известных наличием механизма управления обусловленностью ММС и, следовательно, численной устойчивостью вычислительных процессов, а также возможностью применения любых идеальных элементов (вырожденных многополюсников, короткозамкнутых и разомкнутых ветвей, нуллаторов, нораторов, идеальных операционных усилителей, идеальных трансформаторов). Метод ГКБ основан на двух известных результатах – вычислительной схеме выбора гибкой структуры координатного базиса и методики моделирования в стандартном смешанном базисе. Программная реализация ГКБ предусматривает устранение на препроцессорном этапе особых структур второго, третьего и четвертого родов и построение ассоциированной ММС с преимущественно единичной доминирующей диагональю матрицы Якоби.

На процессорном этапе реализуются свойства координатной адаптации. Заметим, что неустраиваемая особая структура первого рода относится к тем вырожденным случаям, которые не имеют практического значения и представляют только теоретический интерес.

Не ограничивая общности решаемой задачи, рассмотрим общую методику *схемотехнической интерпретации итерационных расчетов*. Пусть имеется электронная схема произвольной структуры, многополюсные элементы которой заданы: линейные – произвольной, в том числе смешанной, системой параметров, нелинейные – функциональными зависимостями вида

$$p_i = f_i(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n),$$

где p_i – второстепенные переменные; q_i – основные переменные, которые в зависимости от выбранного способа описания многополюсника определяют напряжение или ток его i -й (j -й) стороны.

Проведем линеаризацию нелинейных функций относительно некоторого k -го нулевого уровня, характеризуемого координатами $Q_{(i)}^{(k)} = (q_1^{(k)}, q_2^{(k)}, \dots, q_n^{(k)})$. Раскладывая функции f_i в ряд относительно точки $Q_{(i)}^{(k)}$ и отбрасывая члены высшего порядка малости получим

$$p_i = f_i(q_1^{(k)}, q_2^{(k)}, \dots, q_n^{(k)}) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(q_1^{(k)}, q_2^{(k)}, \dots, q_n^{(k)})}{\partial q_j} (q_j - q_j^{(k)}).$$

Сопоставление полученного уравнения с уравнением автономного многополюсника

$$p_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} q_j + S_{W_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

позволяет определить линеаризованные параметры нелинейного многополюсника:

$$W_{ij} = \frac{\partial f_i(q_1^{(k)}, q_2^{(k)}, \dots, q_n^{(k)})}{\partial q_j} = \left. \frac{\partial p_i}{\partial q_j} \right|_{q_i=q_j^{(k)}}; \\ S_{W_i} = f_i(q_1^{(k)}, q_2^{(k)}, \dots, q_n^{(k)}) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(q_1^{(k)}, q_2^{(k)}, \dots, q_n^{(k)})}{\partial q_j} q_j = \\ = p_j^{(k)} - \sum_{j=1}^n W_{ij} q_j^{(k)},$$

где W_{ij} – неавтономные; S_{W_i} – автономные параметры многополюсника соответственно. В частном случае, когда выбранный для линеаризации исходный режим характеризуется нулевыми значениями координат $q_1^{(k)} = 0 (j \neq i)$, имеем $S_{W_i} = p_i^{(k)} - W_{ij}q_j^{(k)}$.

Приведение элементов схемы к автономным многополюсникам позволяет, следуя общей методике анализа схем в смешанном базисе [1], получить обобщенное уравнение анализируемой схемы

$$\begin{cases} \psi(Q_1) = M_1^{(k)}Q_1 + M_2S + S_W^{(k)} = 0; \\ \psi(Q) = M^{(k)}Q + S_W^{(k)} = 0, \end{cases}$$

где S_W и $M_1^{(k)}$ – матрицы размеров $(m \times 1)$ и $(m \times m)$, характеризующие линеаризованную электронную цепь; $Q_1 = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ – матрица-столбец базисных переменных; S и M_2 – матрицы размеров $(m_S \times 1)$ и $(m \times m_S)$ внешних задающих источников.

Схемотехническая интерпретация итерационной процедуры. Для описания по методу Ньютона корней уравнения, отображающих нулевой уровень схемы, можно воспользоваться рекуррентным соотношением

$$\begin{aligned} Q_1^{(k+1)} &= Q_1^{(k)} - \Delta Q_1^{(k)} = \\ &= Q_1^{(k)} - J^{-1}(Q_1^{(k)})\psi(Q_1^{(k)}), \end{aligned} \quad (1)$$

которое допускает следующее схемотехническое истолкование. Матрица-столбец невязок $\psi(Q_1^{(k)})$ по базисным переменным характеризует как удовлетворяются записанные в виде

$$\psi(Q^{(k)}) = M^{(k)}(Q^{(k)}) + S_W^{(k)}$$

обобщенные законы Кирхгофа для сходящейся последовательности итераций $Q_1^{(0)}, Q_1^{(1)}, \dots, Q_1^{(k)}, \dots$

Смешанная матрица $M_1^{(k)}$ исходного уравнения является по существу якобианом системы функций $\psi(Q_1)$ в точке $Q_1 = Q_1^{(k)}$:

$$J(Q_1^{(k)}) = \psi'(Q_1)|_{Q_1=Q_1^{(k)}} = M_1^{(k)}.$$

Наконец, обозначив

$$S_{W_1}^{(k)} = M_2S + S_W^{(k)}$$

и подставив в (1) получаем компактное и удобное при анализе итерационное представление

$$Q_1^{(k+1)} = -J^{-1}(Q_1^{(k)})S_{W_1}^{(k)},$$

которое в базисе узловых напряжений [2], [3]

имеет вид $\varphi^{(k+1)} = -Y^{-1}(\varphi^{(k)})J_Y^{(k)}$.

Взаимосвязь итерационной формулы и матричного уравнения свидетельствует о том, что на каждом k -м шаге процесса Ньютона вычислению очередного приближения $Q_1^{(k+1)}$ можно сопоставить расчет электронной цепи, структура схемных связей которой остается неизменной и выражается исходным полюсным графом, в то время как параметры нелинейных автономных многополюсников (и, следовательно, элементы $M_1^{(k)}$ и

$S_W^{(k)}$, отвечающие основным переменным сторон этих многополюсников) подлежат обновлению в соответствии с состоянием матрицы-столбца $Q_1^{(k)}$. Исследуемая электронная цепь представляется, таким образом, последовательностью линейных эквивалентов, каждый k -й из которых можно считать адекватным исходной нелинейной цепи на k -м шаге процесса приближений. Заметим, что организация вычислений по формуле имеет преимущество перед классической схемой в том отношении, что избавляет от необходимости определять для каждого приближения элементы матрицы-столбца невязок $\psi(Q_1)$ и, главное, представляет благоприятные возможности для управления сходимостью.

Управление итерационным процессом. Применение изложенной техники, однако, не гарантирует успех, если не принять во внимание требование условия сходимости метода Ньютона [2], [3] $2B_0\eta_0k \leq 1$, где в обозначениях, принятых в данной статье,

$$\begin{aligned} B_0 &\geq \|J^{-1}(Q_1^{(0)})\|; \\ \eta_0 &\geq \|J^{-1}(Q_1^{(0)})\psi(Q_1^{(0)})\| = \|\Delta Q_1^{(0)}\|; \\ k &\geq \max\|\psi''Q_1\| = \max\|J^1(Q_1)\|. \end{aligned}$$

Действительно, если норма матрицы, обратной якобиану $J(Q_1^{(0)})$, и норма матрицы-столбца приращений $\Delta(Q_1^{(0)})$ могут быть существенно уменьшены за счет более тщательного выбора начального приближения, то норма матрицы $\psi''(Q_1)$ зависит в первую очередь и прежде всего

от характера составляющих матрицы-столбца $Q_1^{(k)}$. При этом для каждого многополюсного элемента имеет смысл установить границы областей его вольт-амперных характеристик, в пределах которых условие удовлетворяется наилучшим образом при задании вполне определенной совокупности основных переменных сторон $Q_{(k_i)} \subset \{Q_{(k_1)}, Q_{(k_2)}, \dots\}$.

В общем случае можно предложить 2 подхода к расчету нулевого уровня, призванных, благодаря мерам, ограничивающим рост $\|\psi''(Q_1)\|$, обеспечить расширение области притяжения и устойчивость вычислений по методу Ньютона.

Реализация на ЭВМ изложенной методики требует создания двух групп алгоритмов расчета нулевого уровня и его неустойчивости, которые позволяют автоматизировать анализ широкого класса электронных схем. Алгоритмы группы I осуществляют методику выбора гибкой структуры координатного базиса и предназначены для расчета схем, нелинейный режим многополюсных элементов которых априорно не известен и может быть произволен. Алгоритмы группы II исходят из задания схемных компонентов фиксированной системой параметров и ориентированы на обслуживание частного, но весьма распространенного и важного класса электронных схем непрерывного типа, для которых наиболее характерен квазилинейный режим работы.

Отличительной особенностью разработанных алгоритмов является исключение операций с нулевыми элементами матриц, сопровождающих этап формирования уравнений. Последнее достигается благодаря использованию методики выбора стандартного смешанного базиса. Обоснование выбора системы базисных переменных дается в [1], [3].

Рассмотрим для определенности нелинейную модель транзистора. Трактую транзистор как автономный трехполюсник, найдем соотношения для определения его автономных S_{W_i} и неавтономных W_{ij} параметров в зависимости от уровня смещения p - n -переходов. При этом нелинейные сопротивления r_3 , r_K (проводимости y_3 , y_K) и напряжения e_3 , e_K (токи j_3 , j_K) вычисляются по известным значениям напряжения U_i (тока I_i) i -го (эмиттерного или коллекторного) диода как

$$r_i = \frac{m_i \phi_{Ti}}{I_{0i} + I_i}; \quad y_i = \frac{I_{0i}}{m_i \phi_{Ti}} \exp \frac{U_i}{m_i \phi_{Ti}};$$

$$e_i = U_i - I_i r_i = m_i \phi_{Ti} \left[\ln \frac{I_{0i} + I_i}{I_{0i}} - \frac{I_i}{I_{0i} + I_i} \right];$$

$$j_i = y_i (m_i \phi_{Ti} - U_i) = I_{0i} \left[\left(1 - \frac{U_i}{m_i \phi_{Ti}} \right) \exp \frac{U_i}{m_i \phi_{Ti}} - 1 \right],$$

где ϕ_T – температурный потенциал (при $T = 300$ K $\phi_T = 25$ мВ).

Электрофизические параметры модели имеют здесь общепринятые обозначения. Выражения установлены на основании общей методики преобразования подсхемы к эквивалентному многополюснику, характеризуемому произвольной смешанной системой параметров.

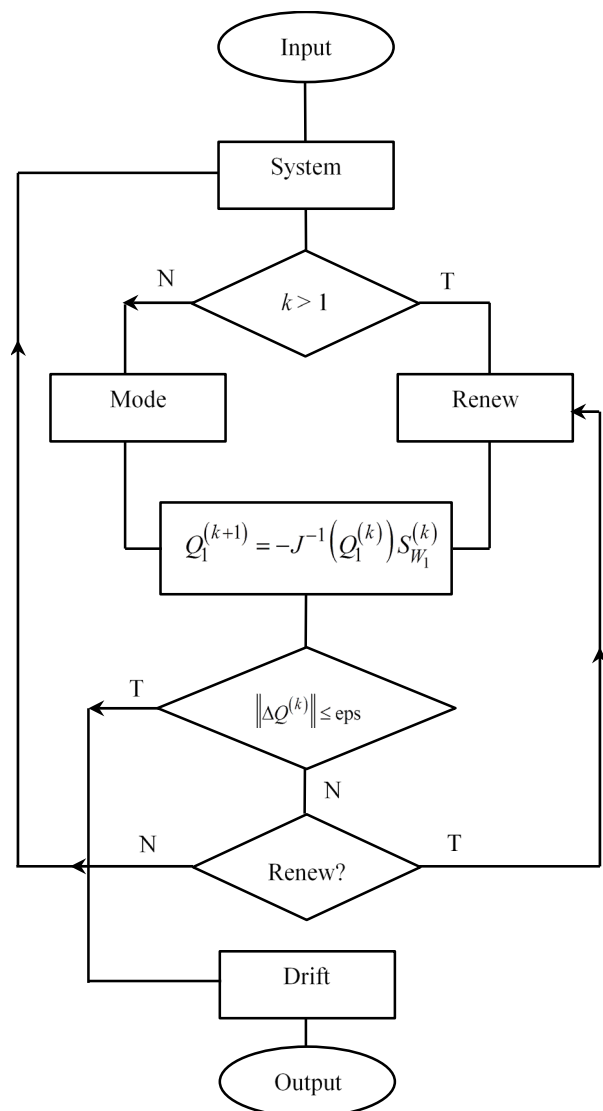


Рис. 3

Алгоритмы группы I взаимодействуют в соответствии с функциональной схемой (рис. 3), единой для обеих обсуждаемых программ. Операции по составлению при $k = i$ компактных массивов,

отображающих результирующие матрицы $M_1^{(k)}$, $S_{W_1}^{(k)}$ системы линеаризованных уравнений (блок Mode), и операции по решению в соответствии с описанной методикой этих уравнений оформлены в качестве двух самостоятельных подпрограмм. Подпрограмма, осуществляющая решение уравнений, содержит обобщенные блоки и процедуры System и Renew.

Процедура System исходя из анализа координат матрицы-столбца $Q_1^{(k)}$ осуществляет выбор рациональных систем параметров многополюсников схемы с тем, чтобы минимизировать норму матричной функции $\Psi''(Q_1)$. Последняя в случае применения стандартного базиса вычисляется так:

$$\|\Psi''(Q_1)\|_m = \max_{(i)} \sum_{(k)} \sum_{(l)} \left[(W_{11,k} + W_{12,k})' + (W_{22,l} + W_{21,l}) \right].$$

Здесь суммирование ведется по всем k и всем l нелинейным элементам, принадлежащим i -й строке матрицы (рис. 4, а). Поведение той или иной производной в зависимости от неавтономного параметра W_{ij} отображается экспоненциальными или логарифмическими зависимостями вида $f_1(I_i)$ и $f_2(U_j)$ (рис. 4, б).

Как только основной ток (основное напряжение) i -й стороны произвольного нелинейного многополюсника схемы превысит некоторый фиксированный для каждого элемента уровень

$I_i^{(k)} \geq I_i^{(*)} (U_j^{(k)} < U_j^{(*)})$, характер i -й (j -й) стороны средствами процедуры Renew автоматически меняется на противоположный (рис. 4).

Алгоритмы группы II взаимодействуют с помощью процедур System, Mode и Drift и обеспечивают анализ неустойчивости НУ в условиях воздействия дестабилизирующих внешних факторов. Рабочая точка любого нелинейного многополюсника вследствие принятого контроля основных переменных его сторон всегда располагается в той области характеристик, где доставляются конечные и достаточно близкие к нулю значения f_1 , f_2 и, следовательно, $\|\Psi''(Q_1)\|$. В состав системы, наряду с базовым алгоритмом гибкого координатного базиса, включен алгоритм наращивания напряжений источников питания (способ взвешенных источников), позволяющий управлять областью сходимости метода продолжения решения по параметру (МПП [6]) при расчете нулевого уровня радиоэлектронных схем.

Решение задач автоматизации расчета НУ по вычислительной схеме МПП на k -м шаге процесса может быть описано формулой

$$H(Q, \lambda) = \begin{cases} M_1 Q + \lambda M_2 S + S_W(Q); \\ M_1 Q + M_2 S + [\lambda S_W(Q) + (1 - \lambda) C_0 Q]; \\ M_1 Q + M_2 S + \sum_{i=1}^{\lambda} \frac{1}{i!} \frac{\partial S_W(Q)}{\partial Q^i} Q^i, \end{cases}$$

где C_0 – константа метода.

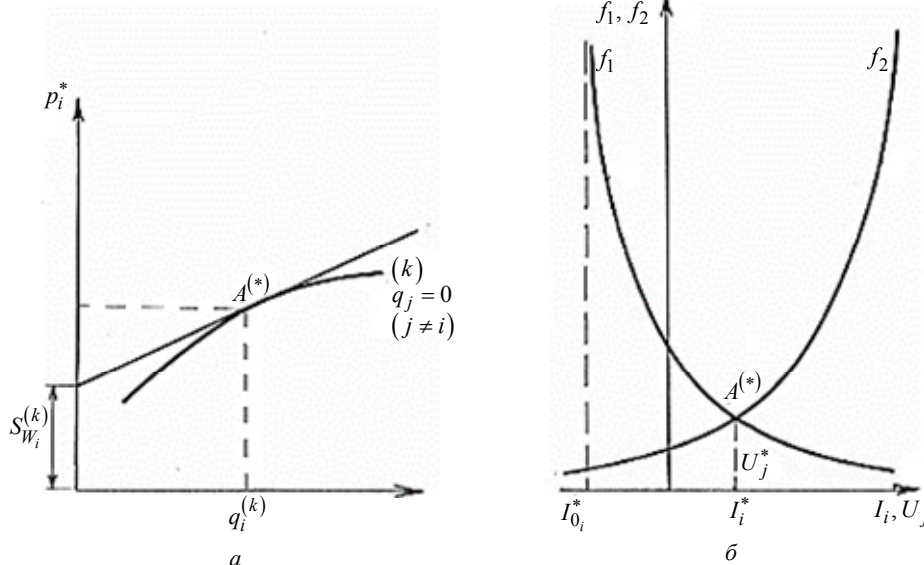


Рис. 4

В основу данного алгоритма положен тот факт, что в обесточенной схеме решение уравнений статического режима известно и тождественно равно нулю. Если теперь увеличить номиналы источников питания, то решение будет уже не нулевым, однако приращение может быть выбрано столь малым, что сходимость итерационного процесса будет обеспечена. Выбирая в качестве начальных условий полученное решение, опять увеличивают значения питающих напряжений и токов, и так до тех пор, пока эти значения не будут равны номинальным. Множитель λ является в данном случае коэффициентом при источниках питания, т. е. $E_m = \lambda_m E$, $I_m = \lambda_m I$. Очевидно, что при $\lambda = 0$ имеем нулевое решение, а при $\lambda = 1$ переходим к схеме с номинальными значениями питания. Задача расчета статического режима свелась таким образом к расчету ряда нелинейных схем, отличающихся друг от друга значениями параметра λ . Алгоритм допускает простую геометрическую иллюстрацию. Так, при расчете диодно-резистивной цепи каждому значению параметра λ соответствует своя нагрузочная характеристика H_m , которая при стремлении λ к единице будет смещаться к истинной нагрузочной характеристике $H(\lambda = 1)$. При этом решение представляет собой последовательность значений напряжений $U_1, \dots, U_m$, сходящуюся к истинному решению U_A . Отметим, что в данном случае практически исключается возможность переполнения разрядной сетки ЭВМ.

Рассмотренный алгоритм позволяет повысить алгоритмическую надежность сходимости итерационных процессов. Необходимо, однако, отметить, что улучшение сходимости достигается за счет существенного увеличения общего числа итераций и, следовательно, времени счета. Для выбора наиболее адекватного алгоритма продолжения решения по параметру были проведены соответствующие численные эксперименты. Анализ данных и практика решения реальных проектных задач широкого класса доказывают эффективность комбинированной техники совместного применения алгоритма гибкого координатного базиса и алгоритма управления сходимостью метода наращивания источников питания, базовых при оптимизации статических частотных и временных характеристик РЭС в системе ДИСП.

Подсистему оптимизации статического режима радиоэлектронных схем характеризуют 3 принципиальные особенности:

- реализация процедуры гибкого координатного базиса, гарантирующего устойчивость итерационных процессов расчета статических режимов;
- наличие диалогового инструментального ядра, инвариантного к предметной области, допускающего возможность динамической модификации операционной модели диалога, исходя из апостериорной оценки складывающейся проектной ситуации;
- наличие инструментальных средств для решения задач параметрической оптимизации с учетом векторного характера целевой функции, выражающей требования к объекту проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В. И., Дмитриевич Г. Д. Диалоговые системы схемотехнического проектирования. М.: Радио и связь, 1988.
2. Ильин В. Н. Основы автоматизации схемотехнического проектирования РЭА: учеб. пособие М.: Изд-во МАИ, 1988.
3. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высш. шк., 1986.
4. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984.
5. Dmitrevich G. D., Pavlushin V. A., Al-Rusan M. B. N. CAD building concepts for the complex objects // Intren. conf. on soft computing and measurements SCM-2003. SPb: SPbGETU, 2003. P. 177–178.
6. Hannan E. L. Nondominance in Goal Programming // INFOR. 1978. Vol. 18, № 4. P. 300–309.
7. Anisimov V. I., Dmitrevich G. D., Gridin V. N. Methods of Constructing High-performance Distributed Computer-Aided Design Systems SCM'2016. SPb: SPbGETU, 2016. Vol. 2. P. 158–160.
8. Хайнеман Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSpICE / пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2008.
9. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. М.: Солон, 1999.
10. Дмитриевич Г. Д., Павлушин В. А., Аль-Русан М. Б. Х. Концепции построения САПР сложных объектов // Междунар. конф. по мягким вычислениям SCM-2003. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. С. 177–178.
11. Гринин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов В. И. Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-технологий // Информационные технологии. 2011. № 5. С. 23–27.

12. Methods of Constructing Service-oriented Computer – Aided circuit design systems based on WebSocket Protocol and Oracle Database (2017) / V. N. Gridin, G. D. Dmitrevich, V. I. Anisimov, S. A. Vasiliev // Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf., SPb, 2017. P. 409–412.

13. Организация информационного обеспечения web-ориентированных схемотехнических САПР / В. Н. Гридин, В. И. Анисимов, Г. Д. Дмитриевич, А. И. Ларистов, Я. М. Аль-Шамери // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 2. С. 134–139.

V. N. Gridin
Russian Academy of Sciences

V. I. Anisimov, G. D. Dmitrevich, M. A. Al-Noumani Said
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

OPTIMIZATION OF STATIC MODE OF RADIO ELECTRONIC CIRCUITS

Questions of construction of open CAD of radio-electronic circuits are considered. The solution of the problem of optimization of characteristics of radio-electronic circuits using mathematical models of circuits that adapt to the specific features of the designed circuit is presented. The strategy of the search of optimal design solutions based on multi-step scheme, multi-objective optimization. Include refactoring engine static mode RA-dielectronic schemes. Universal CAD tools are open to new elements of mathematical support, as well as to new technologies and subject areas. The main disadvantages of universal circuit design systems are eliminated: a complicated algorithm for specifying variable parameters and target functions; a limited set of optimization algorithms; the closed optimization subsystem for connecting an external library of optimization methods.

Electronic circuit, flexible coordinate basis method, mathematical model of circuits, automation of circuit design, vector optimization, optimal design system

УДК 004.415

А. В. Смирнов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Методы оценки и управления качеством программного обеспечения

Рассматриваются проблемы качества программных продуктов, выделены основные метрики программного кода, с помощью которых возможно отслеживать уровень их качества, а также формализованы основные подходы, используемые в разработке и позволяющие управлять качеством программного обеспечения. Выделены 13 практических методов, которые позволяют влиять на качество программного обеспечения на различных этапах работы над проектом: прямые и косвенные. Для них предложен комплекс метрик, позволяющий выявить эффективность каждой методики в отдельном конкретном случае. Предложены способы проверки достоверности показателей оценивания. Среди прямых практических методов выделены методы, выполняемые командой разработчиков, и методы, выполняемые командой тестировщиков. Применение методик на различных этапах разработки проекта позволяет отслеживать динамику изменения уровня качества программного обеспечения, своевременно вносить изменения в процесс его разработки с целью повышения качества конечного программного продукта.

Программное обеспечение, метрики исходного кода, мутационное тестирование, покрытие кода, модульное тестирование, рефакторинг, качество программного обеспечения

С момента появления персональных компьютеров программные продукты стали повсеместно использоваться в качестве коммерческого товара. Тем

не менее они не всегда обладают определенными потребительскими свойствами, в частности, не удовлетворяют критериям качества и безопасности,