А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 3 1980

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 65.012.122

В. П. ИЛЬИН
(Новосибирск)

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ И ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ САПР ЭОС

Введение. В настоящее время имеется достаточно большое количество публикаций, посвященных методам автоматизации расчетов электронно-оптических систем (ЭОС) на ЭВМ (см., например, [1—5] и цитируемые там работы). Достигнутый уровень эффективности алгоритмов решения данного класса задач, опыт разработок пакетов прикладных программ и техническое оснащение современных ЭВМ делают актуальной проблему создания систем автоматизированного проектирования (САПР) электронно-оптических систем, и этим вопросам уже посвящен ряд работ [4, 5].

Согласно [6] САПР есть комплекс средств технического, математического, программного, информационного, методического и организационного обеспечения автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователей системы), выполняющих автоматизированное проектирование.

Мы остановимся только на вопросах математического и программного обеспечения САПР ЭОС, ограничиваясь анализом постановки данного класса проблем, обзором численных методов их решения и технологией разработки средств автоматизации программирования этих задач.

В класс задач электронной оптики мы включаем совокупность задач, сводящихся к расчетам электрических и магнитных полей, траекторий заряженных частиц, распределений токов и плотностей зарядов, на основе которых определяются различные функциональные характеристики приборов. Здесь можно выделить достаточно самостоятельные проблемы: а) чисто полевые задачи — расчет стационарных электрических или магнитных полей; б) задачи «геометрической» оптики — определение коэффициентов аберраций, разрешающей способности и других параметров электронно-оптических систем, формирующих изображение; в) самосогласованные задачи — расчеты сильноточных приборов с плотными пучками, в том числе релятивистскими; г) расчеты собственных частот и гармоник электродинамических систем.

К таким постановкам сводятся задачи проектирования самых различных типов электрофизических устройств: изоляционных конструкций, трансформаторов, электрических машин, ускорителей, электронных пушек разного назначения, активных элементов интегральных схем, приборов СВЧ-электроники и т. д.

Целесообразность сведения в единый проект таких разнотипных с инженерно-технической точки зрения проблем объясняется единообразием математических постановок задач, методов их решения и модульным принципом построения пакетов прикладных программ [7], позволяющим добиваться достижения таких антагонистических качеств, как универсальность и экономичность. С одной стороны, частичные конфигурации общей проблемно-ориентированной системы программирования могут автономно развиваться и эффективно использоваться для проектирования конкретных типов приборов, а с другой — несогласованные разработки систем проектирования отдельных рассматриваемых устройств неизбежно приведут к дублированию работы и значительному увеличению трудозатрат.

Математическая постановка. Расчет стационарных электрических или магнитных полей сводится к решению уравнений эллиптического типа, которые ради краткости можно представить формально в единой форме (см. [1, 8, 9]):

$$\Delta u = x^{-\alpha} \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu x^{\alpha} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \beta \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -4\pi f, \tag{1}$$

где μ определяется свойствами среды и является кусочно-постоянной или нелинейной (для ферромагнитных материалов) функцией. В электростатических задачах f есть распределение плотности зарядов ρ, а в магнитных — плотность тока j. Расчетная область G, в которой определяется u, может быть трехмерной ($\beta = 1$, $\alpha = 0$) или двумерной ($\beta = 0$); в последнем случае $\alpha = 0$ соответствует декартовой системе координат («плоские» задачи), а $\alpha = 1$ или -1 — цилиндрической системе (осесимметричные задачи). Случай $\beta = 0$, $\alpha = -1$ встречается только в магнитных задачах, где u — азимутальный компонент векторного потенциала.

Область G может быть открытой или замкнутой, а ее граница Γ состоит из кусков Γ_i, на которых заданы краевые условия одного из следующих типов:

$$u\big|_{\Gamma_i} = q_i(x, y, z); \tag{2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_i} = 0; \tag{3}$$

$$u\big|_{\Gamma_i^+} = u\big|_{\Gamma_i^-}; \quad \mu_i^+ \frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_i^+} = \mu_i^- \frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_i^-}. \tag{4}$$

Движение частицы с зарядом q и массой m описывается уравнением

$$\frac{d}{dt}\left(m \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}\right) = -q\nabla u + \frac{q}{c}\left[\frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \times \boldsymbol{H}\right] \tag{5}$$

и начальными данными

$$\boldsymbol{r}\big|_{t=0} = \boldsymbol{r}_0, \quad \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}\bigg|_{t=0} = \boldsymbol{v}_0,$$

где $\boldsymbol{r}$ — радиус-вектор частицы, c — скорость света, а $\boldsymbol{H}$ — вектор напряженности магнитного поля. Если скорость частицы $\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}$ близка по модулю к c, то в (5) учитываются релятивистские эффекты, причем в этом случае уравнение движения удобно записывать для импульса

$$\frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = -q\nabla u + \frac{q}{c}[\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{H}]; \quad \boldsymbol{v} = \frac{\boldsymbol{p}}{m_0\sqrt{1 + (p/m_0 c)^2}}. \tag{6}$$

Здесь m_0 — масса покоя частицы, а $\boldsymbol{H}$ есть сумма полей внешних токов $\boldsymbol{H}_в$ и собственного пучка частиц

$$\boldsymbol{H}_c(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{c}\int\limits_G \frac{[\boldsymbol{j}(\boldsymbol{r}') \times (\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}')]}{|\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}'|}\, d\boldsymbol{r}'.$$

Плотность тока пучка удовлетворяет уравнению неразрывности

$$\operatorname{div} \boldsymbol{j} = \operatorname{div} \rho \boldsymbol{V} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

($\boldsymbol{V}(\boldsymbol{r})$ — средняя скорость частиц в окрестности точки $\boldsymbol{r}$). На входе пучка в расчетную область G задается начальное распределение плотности тока по координатам и скоростям. В частности, в катодных системах на эмиттирующих поверхностях начальные скорости нулевые, а величина плотности определяется из условия ограничения тока пространственным зарядом:

$$j(\boldsymbol{r} \in \Gamma) = \min \{ j_s \, (4/9) \sqrt{2 |q| / m} \, (u_d - u(\boldsymbol{r}))^{3/2} / d^2 \},$$

где j_s — эмиссионная способность катода, а u_d — потенциал в точке, расположенной на достаточно малом расстоянии d (вдоль нормали) от точки $\boldsymbol{r}$.

Математическая модель сильноточных пучков основана на так называемом методе больших частиц, который в стационарном случае сводится к более простому варианту — методу трубок тока.

Если за время прохождения расчетной области частицей существенно изменяются граничные условия или начальные данные, то используется квазистационарное приближение, основанное на предположении справедливости уравнения (1) для каждого момента времени. В этом случае пучок представляется совокупностью «больших» частиц, имеющих заряды q_i и скорости $\boldsymbol{v}_i$. По их распределению в области определяется величина $\rho(\boldsymbol{r}, t)$. В стационарных полях пучок представляется совокупностью элементарных трубок, форма и ток которых находятся из расчета траекторий с начальными данными, получаемыми из дискретизации начального фронта пучка по координатам и скоростям.

Другая постановка «полевых» задач основана на представлении потенциала в виде интеграла по границе от плотности простого (или двойного) слоя (см. [10, 11] и приведенную там литературу). В первом случае для кусочно-постоянных μ потенциал в точке p ищется в виде

$$u(p) = \int_{\Gamma} \sigma(Q) \, R^{-1}(p, Q) \, dS + 4\pi \int_{G} f(Q') \, R^{-1}(p, Q') \, dV; \quad Q \in \Gamma; \quad Q' \in V, \tag{7}$$

где $R(p, Q)$ есть расстояние между точками p и Q.

В результате подстановки этого представления в граничные условия (2)—(4) получаем систему интегральных уравнений для плотности $\sigma(Q)$, после нахождения которой потенциал вычисляется по формуле (7).

Мы не будем останавливаться на специальных вопросах теории аберраций для приборов, формирующих изображение, так как они подробно освещены, например, в [12, 13]. Постановка таких задач сводится к интегрированию параксиального приближения для уравнения (5) и детальному анализу получаемых решений и их функционалов.

Другой класс задач, связанный с электродинамическими процессами, сводится к нахождению собственных частот и гармоник СВЧ-структур, на основе которых определяются различные функциональные параметры: характеристическое сопротивление, добротность и т. д. Решение в этом случае сводится к частичной проблеме собственных значений, т. е. вычислению нескольких собственных чисел и соответствующих собственных функций оператора Δ:

$$\Delta W_i = \lambda_i W_i, \quad i = 1, \ 2, \ \ldots, \tag{8}$$

если W_i удовлетворяет однородным краевым условиям вида (2)—(4).

Рассмотренные постановки относятся к так называемым прямым задачам, когда по заданным граничным и начальным условиям требуется найти соответствующее решение. Однако в практике проектирования необходимо в основном отыскивать конструкцию прибора, обладающего нужными функциональными характеристиками и удовлетворяющего не-

Характеристика численных алгоритмов. Основные вычислительные проблемы, возникающие при решении рассмотренного класса задач, можно разбить на следующие группы: расчет полей в двумерных и трехмерных областях со сложными границами, интегрирование уравнений заряженных частиц, расчет плотностей зарядов и токов, оптимизация решений краевых задач и вычисление различных функционалов, определяющих характеристики ЭОС.

Необходимо подчеркнуть, что в математическом обеспечении САПР принципиальное значение имеют проблемы автоматизации построения алгоритмов и их универсализации. Очевидно, например, что алгоритмы расчета полей, ориентированные только на конкретную конфигурацию прибора, будут иметь малую практическую ценность. В то же время реализация методов, рассчитанных на произвольные геометрии областей, намного сложнее, чем для методических примеров.

Мы не сможем, естественно, дать исчерпывающую характеристику алгоритмов, по которым имеется огромная литература (отметим монографии последних лет [14—18]). Цель данного раздела заключается в кратком обзоре основных методов расчета полей, траекторий, токов и зарядов, проведении их сравнительного анализа и оценок трудоемкости реализации на ЭВМ.

Методы расчета полей. Расчеты полей проводятся с помощью трех основных классов алгоритмов: конечных разностей, конечных элементов и интегральных уравнений. Реализация любого из этих методов включает этапы построения дискретной сети, формирования системы алгебраических уравнений, аппроксимирующей исходную задачу, и решения полученной системы.

Конечно-разностные методы наиболее исследованы и распространены для прямоугольных (в трехмерном случае — параллелепипедоидальных) сеток с постоянными или кусочно-постоянными шагами. На равномерной сетке в двумерных задачах 5-точечные аппроксимации обеспечивают точность $O(h^2)$ и 9-точечные — $O(h^4)$ (для трехмерных задач аналогичные результаты достигаются на 7- и 19-точечных аппроксимациях). Здесь и далее h есть характерный шаг сетки, причем для неравномерных сеток все шаги считаются величинами одного порядка. Аппроксимации усложняются для узлов в окрестности криволинейной границы (особенно с краевыми условиями, содержащими производные). В частности, для задач с разрывными коэффициентами μ и криволинейной границей раздела достигаемая точность есть только $O(h)$. Для областей с кусочно-гладкими границами разработаны аппроксимации в окрестности угловых точек, учитывающие особенность решения и обеспечивающие точность $O(h^2)$.

Для решения систем линейных конечно-разностных уравнений имеются эффективные итерационные алгоритмы, исследованные с учетом ленточной блочной структуры матриц: неявные методы верхней релаксации, продольно-поперечных прогонок, попеременно-треугольные, в том числе с применением чебышевских и градиентных методов ускорения. Эти методы позволяют получить решение за количество действий $O(h^{-5/2}|\ln h|)$ для двумерных задач и $O(h^{-7/2}|\ln h|)$ для трехмерных при числе итераций $O(h^{-1/2}|\ln h|)$. Поскольку практические требования к точности заставляют использовать большое количество узлов, например в двумерных задачах от одной до десяти тысяч, то при решении задач на ЭВМ типа БЭСМ-6 становится существенным вопрос об организации хранения разностных коэффициентов и другой вспомогательной информации. Достаточно эффективной оказывается стратегия, когда для около-граничных узлов сетки разностные коэффициенты хранятся, а в остальных — вычисляются на каждой итерации, так как они выражаются очень простыми формулами. В этом случае требуемый объем оперативной памяти есть всего $2L - 3L$ слов (L — число узлов сетки).

Отличительным фактором методов конечных элементов является то, что сетка в области подстраивается под конфигурацию границы и как следствие является существенно неравномерной. В этом заключается достоинство алгоритмов, но это также усложняет структуру матрицы аппроксимирующей системы алгебраических уравнений, которая получается из приближенной минимизации вариационного функционала, соответствующего исходной краевой задаче. К настоящему времени имеется большое количество методов с треугольными и четырехугольными конечными элементами, в том числе криволинейными. Для аппроксимаций 1-го, 2-го и более высоких порядков по h (в том числе с учетом особенностей решения в окрестности угловых точек) разработана хоть и громоздкая, но достаточно единообразная технология автоматизации построения алгоритмов. Наиболее распространены в данном случае прямые методы решения получаемых алгебраических систем (модификации методов Гаусса или Холесского с учетом ленточной структуры матриц). При этом объемы вычислений и требуемой памяти составляют $O(h^{-3})$ для двумерных и $O(h^{-5})$ для трехмерных задач. Это означает, например, что на БЭСМ-6 без использования магнитных барабанов реально можно считать только двумерные задачи с размером сетки примерно 30×30. Если используются итерационные методы, то требуется объем памяти $8L$ или более машинных слов.

Как для метода конечных разностей, так и для метода конечных элементов представляется перспективным разбиение области на подобласти с поочередными расчетами в каждой из них (если подобласти перекрываются, то получается аналог альтернирующего метода Шварца). При этом целесообразно выделять прямоугольные подобласти с равномерной сеткой, в которых можно проводить решение экономичными методами циклической редукции или быстрого преобразования Фурье.

Эффективность сеточных методов удается значительно повысить путем использования вспомогательных редких сеток [19]. В простейшем случае расчет ведется сначала на сетке с шагами, вдвое большими, чем у основной, затем полученные результаты интерполируются в узлы основной сетки, и решение уточняется далее каким-либо итерационным методом. При этом, как показывают теоретические оценки и эксперименты, объем вычислений сокращается в несколько раз. Кроме того, линейная комбинация решений на вспомогательной и основной сетках в совпадающих узлах позволяет повысить порядок точности (так называемая экстраполяция Ричардсона).

Особенностью методов интегральных уравнений является то, что искомая функция плотности σ зависит от меньшего числа переменных, чем размерность расчетной области. В частности, для двумерных задач σ есть функция только одного параметра — длины граничных линий. Поэтому ее аппроксимации высокой точности, например в виде сплайнов 3-го или 5-го порядка, достаточно легко реализуются даже с учетом особенностей в угловых точках. Однако матрицы алгебраических систем уравнений, получаемых при этом методом коллокаций, являются плотными. Поэтому хоть их порядки гораздо меньше, чем в сеточных методах ($O(h^{-1})$ в двумерных задачах и $O(h^{-2})$ в трехмерных), объем памяти, необходимой для запоминания их элементов, составляет соответственно $O(h^{-2})$ и $O(h^{-4})$. Матрицы имеют достаточно сложно вычисляемые коэффициенты (их расчет для двумерных областей требует $O(h^{-2})$ операций) и трудно исследуемые спектральные свойства. Поэтому, за исключением только некоторых частных задач [20, 21], для методов интегральных уравнений теории потенциала отсутствуют теоретические оценки точности. Только экстраполируя имеющиеся результаты для отдельных типов областей, можно ожидать, что погрешность метода та же, что и ошибка аппроксимации плотности σ, которая, например, для кубических сплайнов есть $O(h^4)$. Высокая точность такого алгоритма подтверждается экспериментами на модельных задачах как в отношении расчета потенциала, так и его производных (100—130 точек дискретизации границы обеспечивают точность 4-5 знаков, чего, по-видимому, трудно добиться методами сеток).

Значительным преимуществом методов интегральных уравнений является возможность непосредственных расчетов задач с открытыми областями, в то время как для методов сеток в этом случае приходится искусственно вводить замкнутую границу, задавая на ней приближенно краевые условия из качественных соображений. Это приводит к существенной погрешности результатов или требует значительного увеличения расчетной области (по отношению к интересующей окрестности) и возрастания необходимого времени счета.

Трудоемкость решения системы алгебраических уравнений для двумерных задач примерно та же, что и в сеточных алгоритмах — $O(h^{-3})$, но существенно больше — $O(h^{-6})$ — для трехмерных. Необходимо отметить, что при этом в интегральных методах находится только распределение плотности и для вычисления потенциала в каждой точке требуется взять интеграл по границе; это означает дополнительно $O(h^{-1})$ операций для двумерных задач и $O(h^{-2})$ для трехмерных. Поэтому такие алгоритмы малоэффективны в задачах, требующих вычислений потенциалов в большом числе точек. К этому классу относятся самосогласованные задачи с плотными пучками, в которых для определения объемных зарядов необходимо рассчитывать значительное количество траекторий. В этом случае (как и для других задач с ненулевыми правыми частями) при построении алгебраических уравнений требуются еще дополнительные операции ($O(h^{-3})$ в двумерных областях и $O(h^{-5})$ в трехмерных) для взятия интегралов по объему.

Для решения частичной проблемы собственных значений (8) успешно применяются сеточные методы, основанные на степенных итерационных процессах или верхней последовательной релаксации [22]. Эффективность алгоритмов намного повышается, если применяются аппроксимации с учетом особенностей в угловых точках и расчеты на вспомогательной редкой сетке с экстраполяцией Ричардсона.

Резюмируя приведенные рассуждения, можно сделать следующие (не слишком категоричные) выводы:

1. Рассмотренные методы в совокупности обеспечивают расчеты электрических и магнитных полей на современных ЭВМ с необходимой для основных практических задач точностью.

2. Для задач геометрической оптики или чисто полевых задач с расчетами потенциалов и напряженности в малом числе точек целесообразно применять метод интегральных уравнений.

3. Решение самосогласованных задач, расчеты собственных частот и гармоник, а также многих чисто полевых задач эффективно осуществляются сеточными методами, особенно при учете особенностей в угловых точках и использовании вспомогательных редких сеток с экстраполяцией Ричардсона. При этом для областей, не содержащих сильно искривленных или разномасштабных деталей границы, экономичными оказываются методы конечных разностей.

4. Представляется перспективным комбинирование сеточных и интегральных методов. Последние, например, могут использоваться для замыкания граничных условий в открытых областях или для разбиения

области на простые подобласти, после чего эффективно применяются конечно-разностные алгоритмы.

5. Выбор оптимальных методов для определенных типов задач достаточно обоснован только после анализа экспериментальных данных, которых в настоящее время явно недостаточно. Теоретические результаты дают только порядки асимптотических оценок объема вычислений, в то время как коэффициенты могут играть определяющую роль в приемлемости метода.

6. Практическая ценность алгоритма зависит, возможно, главным образом от технологичности реализации (оптимальность сеточных параметров, качество программы и т. д.), степени автоматизации их настройки на различные виды задач и удобства представления исходных данных и результатов.

Алгоритмы расчета траекторий. Выбор того или иного метода интегрирования уравнений движения заряженных частиц в значительной степени зависит от характера решаемой задачи. Так, в задачах геометрической оптики, когда требуется расчет точек траектории с погрешностью не более 10^{-4}—10^{-5} и производные потенциала вычисляются с высокой точностью по методу интегральных уравнений, целесообразно использование методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с погрешностью $O(\tau^4)$ (τ — временной шаг интегрирования). Среди них наиболее экономичным, учитывающим специфику уравнений движения является метод Штермера. С другой стороны, в самосогласованных задачах, когда рассчитываются характеристики пучка в целом и не нужна прецизионная точность по отдельным траекториям, предпочтительными являются методы 2-го порядка, требующие только однократного вычисления производных потенциала на каждом временном шаге. С одной стороны, это оправдано тем, что потенциалы определяются сеточными методами в узлах сетки уже с погрешностью, а затем еще добавляется ошибка при вычислении производных путем численного дифференцирования. Кроме того, существенно, что в расчете очередной точки траектории реализация самих формул интегрирования занимает малый объем операций по сравнению с разнообразным сопутствующим сервисом: анализом положения точки относительно узлов сетки, вычислением производных, проверкой на окончание траектории и т. д.

Для некоторых типов задач (например, с тормозящими полями) большое значение имеет контроль энергетического баланса частиц при численном расчете траекторий. С этой целью используются также балансные схемы интегрирования с погрешностью $O(\tau^2)$. Кроме того, перспективными представляются кусочно-аналитические методы, когда в пределах сеточного треугольника (или прямоугольника) уравнения движения интегрируются точно при кусочно-линейной аппроксимации потенциала по его значениям в узлах.

Отметим, что в релятивистских задачах существенную экономию в расчетах траекторий дает использование вместо (5) уравнений движения «в импульсах» (6).

В самосогласованных задачах расчет траекторий, когда их количество достигает нескольких сотен или тысяч, занимает существенную долю в общем времени решения. Поэтому имеет большое практическое значение экономичная реализация алгоритмов для каждого типа задачи: двумерной или трехмерной, с магнитным полем или без него, релятивистской или нерелятивистской и т. д. (см. [1, 23]). Фактически это приводит к необходимости разработки библиотеки алгоритмов, реализующих отдельные варианты.

Вычисление токов и объемных зарядов. Самосогласованные задачи имеют существенную нелинейность, и ее характер зачастую играет определяющую роль в трудоемкости расчетов. Это относится в первую очередь к расчету режимов, близких к существованию виртуальных катодов, когда в области образуются потенциальные ямы и часть пучка запирается.

Решение самосогласованных задач проводится итерациями «по объемному заряду». Находится начальное распределение поля (чаще всего из уравнения Лапласа), далее рассчитываются траектории и обусловленные ими заряды, затем снова ведется расчет поля и т. д.; процесс продолжается, пока приближения не сойдутся с заданной точностью. При этом используется метод нижней релаксации по объемным зарядам. Если $\widehat{\rho}^{n+1}$ — функция плотности, найденная из расчета траекторий в поле u^{n+1}, то в качестве следующего приближения для ρ берется величина

$$\rho^{n+1} = \omega_n \widehat{\rho}^{n+1} + (1 - \omega_n)\rho^n, \quad 0 < \omega_n < 1,$$

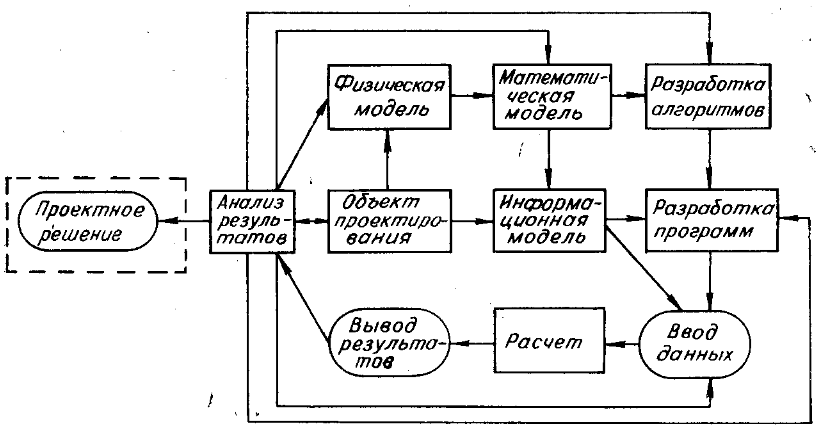
где ω_n — специальным образом подбираемые параметры.

В каждой ячейке сетки величина заряда вычисляется суммированием зарядов всех больших частиц или отрезков элементарных трубок тока, находящихся в данной ячейке.

Для катодных систем на каждой итерации вычисляется также на основе аппроксимации формулы (7) плотность тока эмиссии. Иногда при этом целесообразно проводить релаксацию не объемного заряда, а плотности тока j.

Расчет плотных пучков с достаточной точностью зачастую удается проводить за 10 итераций или меньше, но имеются также «трудные» задачи, требующие до сотни и более приближений по объемному заряду. Какие-либо теоретические результаты по свойствам таких итераций или надежные рекомендации по алгоритмам практически отсутствуют.

Технология разработки и функционирования программного обеспечения САПР. Процесс автоматизированного проектирования можно представить схемой, изображенной на рисунке. Первым этапом является формулировка физической модели, заключающаяся в оценке влияния тех или иных факторов на характеристики объекта проектирования. Далее проводится математическая постановка — задание модели объекта, состоящей в описании системы дифференциальных или интегральных уравнений, за которой следует разработка численных алгоритмов. После этого выполняются работы, непосредственно связанные с ЭВМ: разработка программ на алгоритмических языках (включающая этапы написания, отладки и опытной эксплуатации) и проведение расчетов. Самостоятельное значение имеет формирование информационной модели объекта, которая обеспечивает функционирование САПР и может включать сведения о реальных ЭОС, об их моделях, алгоритмах и программах, о форматах ввода-вывода данных и т. д.



Ключевым этапом является принятие решения о дальнейшем ходе проектирования. На основе анализа результатов и их сравнения с данными физического эксперимента делаются выводы о проведении дальнейших расчетов, модернизации программ, модификации алгоритмов, изменении моделей.

Программное обеспечение САПР ЭОС может составлять десятки тысяч машинных слов, объем одновременно обрабатываемых данных — десятки и сотни тысяч чисел, а расчеты требуют пропуска большого количества вариантов со значительными затратами времени и ресурсов ЭВМ.

Пакеты прикладных программ проектирования. Математическое и программное обеспечение САПР должно удовлетворять следующим основным требованиям:

а) полнота физической и математической моделей, охватываемых составом разработанных программ;

б) эффективность реализованных алгоритмов, определяемая в первом приближении количеством машинного времени, необходимого для получения решения с заданной точностью. При более строгих оценках необходимо учитывать стоимость затрачиваемых на расчеты всех ресурсов ЭВМ и трудовых затрат на разработку программ;

в) простота и удобство в эксплуатации: оперативность пропуска задач на ЭВМ, наглядное и экономичное представление исходной информации и результатов счета, доступность общения с ЭВМ (диалоговые средства или в пакетном режиме сообщения об ошибках и промежуточных результатах), полнота и строгость документации;

г) надежность алгоритмов и программ: высокая степень отлаженности, безотказность, обеспечение требуемой точности, наличие разнообразных тестов;

д) расширяемость состава алгоритмов и программ, возможность оперативного изменения или расширения математической модели без существенной модернизации программного обеспечения;

е) адаптируемость программного обеспечения к изменению конфигурации вычислительной системы.

Для инженеров-проектировщиков — предполагаемых основных пользователей программного обеспечения САПР — его архитектура представляется идеальной в форме «черного ящика»: инструкции полностью указывают его назначение, способы задания исходных данных и представления результатов без сведений о внутренней структуре. Однако с точки зрения эффективности эксплуатации САПР предпочтительнее пользователи, имеющие квалификацию инженеров-математиков, знающие характеристики алгоритмов и программ и умеющие применять их наиболее продуктивно. Кроме того, пользователями могут быть и математики-программисты, осуществляющие развитие программного обеспечения в плане повышения качества алгоритмов или расширения класса реализуемых моделей.

Программное обеспечение САПР по своей сути представляет пакет прикладных программ, под которым понимается совокупность программ, совместимых по структуре данных и способам управления и объединяемых общностью функционального назначения как средства решения класса задач определенным кругом пользователей [7].

Основным принципом построения пакетов является модульность структуры. Применительно к данному классу задач это означает, что выделяются математические модули, представляющие отдельные подзадачи, каждую из которых можно описать видом исходных данных, используемыми алгоритмами и результатами. При этом решение любой конкретной задачи заключается в исполнении указываемой последовательности модулей. Соответственно сам пакет представляется совокупностью программных модулей и средств управления их работой. Программным модулем можно в принципе объявить любой программный компонент, который определяется своими входами, выходами, исходными данными, результатами и функциональным назначением. Это может быть программный блок, функция, процедура или их совокупность. Конфигура-средства управления вычислительным процессом; средства работы с данными и общения с пользователем.

Библиотека пакета проектирования ЭОС должна включать большое число вспомогательных модулей для решения двумерных и трехмерных задач, линейных и нелинейных, совокупность которых позволяла бы рассчитывать широкий класс приборов и в то же время для каждого случая давала бы качественные алгоритмы, реализованные с учетом конкретной специфики. Опыт разработки таких библиотек отражен в работах [1, 4].

Неотъемлемым компонентом САПР является лингвистическое обеспечение, предоставляющее пользователю-инженеру средства описания сложных геометрических конструкций, параметров приборов и других данных, входящих в задание на проектирование. С другой стороны, результаты проектирования должны представляться в наглядной буквенно-цифровой и графической формах; это могут быть чертежи приборов, графики эквипотенциалей, силовых линий, траекторий и т. д., а также функциональные характеристики с текстовыми комментариями. Для реализации этих средств в библиотеку пакета включаются соответствующие сервисные модули.

Управление вычислительным процессом может осуществляться при разной степени автоматизации. В одном случае оно целиком предоставляется пользователю, но тогда он каждый раз должен составлять управляющую программу. В другом — управляющий блок пакета (так называемый планировщик) по описанию задания определяет граф исполнения модулей. Однако поскольку при этом могут быть реализованы только ранее запрограммированные ситуации, более гибким является вариант, предоставляющий пользователям средства как автоматизированного, так и «ручного» управления.

Расчеты ЭОС, требующие высокой точности, связаны с переработкой такого объема информации, для которого недостаточно оперативной памяти ЭВМ. Поэтому степень автоматизации существенно зависит от средств обмена с внешними устройствами и передачи данных от одного модуля к другому.

Рассмотренные функции пакета в некоторой степени могут быть реализованы только с помощью средств базовой системы программирования (операционной системы) ЭВМ. Однако повышение уровня интеллектуальности пакета и развитие форм общения с пользователем приводят к необходимости разработки специальных системных компонентов (входные языки и трансляторы с них, архивы или банки данных, средства расширения и модернизации библиотек и т. д.).

Пакеты такого уровня фактически являются проблемно-ориентированными системами программирования.

Методологическим вопросам пакетов прикладных программ, их классификации и описаниям конкретных разработок посвящена уже достаточно обширная литература (см., например, [7] и цитируемые там работы).

Вопросы технологии программного обеспечения САПР. Очевидно, что система автоматизированного проектирования может разрабатываться и оперативно функционировать на основе развитого технологического оборудования и штатного программного обеспечения. Это предъявляет требования, во-первых, к быстродействию ЭВМ, объему оперативной, барабанной и дисковой памяти, оснащению терминалами, средствами ввода и вывода буквенно-цифровой и графической информации. Во-вторых, операционная система должна включать средства для организации библиотек программ на разных языках, редактирования текстов, работы с данными, управления прохождением задач и т. д. Пакет программ проектирования является надстройкой над этим базисом, ориентированной на специфические классы задач и пользователей.

Принципиальный момент программного обеспечения САПР заключается в том, что это продукт, отторгаемый от разработчика. Этим предъявляются особые требования к качеству технических документов, регламентируемых Единой системой программной документации (см. ГОСТы ЕСПД в [24]).

Разработка пакета проектирования является задачей, для решения которой необходимо объединение усилий инженеров-физиков, математиков, прикладных и системных программистов, поскольку только в этом случае возможно удовлетворение требований проектировщиков и обеспечение эффективности реализации (как в отношении алгоритмов, так и архитектуры системы).

В первую очередь успех реализации зависит от качества планирования, что, как неоднократно отмечалось в литературе (см., например, [25]), обычно недооценивается. Постановка класса решаемых задач, используемые алгоритмы и общая схема системной организации определяют, насколько современной окажется САПР к моменту ее создания, как она сможет развиваться и сколько лет будет эффективно эксплуатироваться. Сам процесс разработки допускается перманентным: после внедрения первой очереди системы состояние разработки отдельных компонентов находится в различных промежуточных стадиях. Это осуществимо только на основе качественного модульного анализа проблемы, включающего определение состава модулей на математическом и программном уровнях, устанавливающего характер их взаимосвязей и функционирования пакета в целом.

В заключение отметим, что самый идеальный пакет программ проектирования еще не есть САПР, являющаяся, как следует из ее определения, сложной технологической линией, функционирование которой требует решения не менее важных организационных и технических проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ильин В. П.** Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск, Наука, 1974.
2. **Kulsrud E. A.** A Programming System for Electron Optical Simulation.— RGA Review, 1967, vol. 28, N 2, p. 351—365.
3. **Лысенко В. Я., Шишков А. А.** Программа расчета параметров аксиально-симметричных резонаторов и регулярных волноводов.— Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1975, № 5, с. 118—120.
4. **Иванов В. Я.** Автоматизация машинного проектирования приборов электроники.— Препринт № 40. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1977.
5. **Блейвас И. М., Голеницкий И. И., Зайцев С. А. и др.** Автоматизированная система комплексного машинного проектирования изделий СВЧ электронной техники.— Препринт № 40. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1977.
6. **Проектирование** автоматизированное. Термины и определения. ГОСТ 22487-77. М., Изд-во стандартов, 1978.
7. **Ершов А. П., Ильин В. П.** Пакеты программ — технология решения прикладных задач.— Препринт № 121. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1979.
8. **Молоковский С. И., Сушков А. Д.** Интенсивные электронные и ионные пучки. Л., Энергия, 1972.
9. **Дойников Н. И.** Постановка задач численного анализа полей нелинейных магнитных систем.— Препринт. Л., изд. НИИЭФА, 1976.
10. **Тозони О. В.** Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. Киев, Техника, 1967.

11. **Маергойз И. Д.** Итерационные методы расчета статических полей в неоднородных анизотропных и нелинейных средах. Киев, Наукова думка, 1979.
12. **Кельман В. М., Явор С. Я.** Электронная оптика. Л., Наука, 1968.
13. **Куликов Ю. В., Монастырский М. А., Фейгин Х. И.** Теория аберраций третьего порядка катодных линз. Аберрации катодных линз с комбинированными электрическими и магнитными полями.— Радиотехника и электроника, 1978, т. 23, № 1, с. 167—174.
14. **Марчук Г. И.** Методы вычислительной математики. М., Наука, 1977.
15. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. М., Наука, 1977.
16. **Стренг Г., Фикс Дж.** Теория метода конечных элементов. М., Мир, 1977.
17. **Штеттер Х.** Анализ методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений. М., Мир, 1978.
18. **Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столяров Е. М.** Методы оптимизации. М., Наука, 1978.
19. **Марчук Г. И., Шайдуров В. В.** Повышение точности решений разностных схем. М., Наука, 1979.
20. **Воронин В. В., Цецохо В. А.** Интерполяционный метод решения интегрального уравнения Фредгольма I рода с логарифмической особенностью.— ДАН СССР, 1974, т. 216, № 6, с. 1209—1211.
21. **Иванов В. Я., Ильин В. П.** О численном решении интегральных уравнений теории потенциала для модельных задач.— Препринт № 33. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1976.
22. **Вазов В., Форсайт Дж.** Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. М., Изд-во ИЛ, 1963.
23. **Ильин В. П., Попова Г. С.** Сравнительный анализ методов численного интегрирования уравнений движения заряженных частиц.— Препринт № 104. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1978.
24. **Единая** система программной документации. ГОСТ 19.101-77, ГОСТ 19.101-77-19.103-77. М., Изд-во стандартов, 1977.
25. **Шараев Д. Я.** Организация больших программ. Свердловск, изд. УрГУ, 1977.

Поступила в редакцию 25 сентября 1979 г.

УДК 621.384 : 681.7.069.32

В. Я. ИВАНОВ

(Новосибирск)

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ЯЗЫК ОПИСАНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

Введение. Описание входных данных для задач расчета характеристик электронно-оптических систем (ЭОС) является достаточно сложной и актуальной проблемой, эффективное решение которой представляет важный шаг повышения степени автоматизации расчетов и машинного проектирования. Эта проблема рассматривалась автором в работе [1] для широкого класса задач электростатики и электронной оптики, описанного в [2]. При решении задач оптимизации характеристик ЭОС в значительной степени возрастает разнообразие вариантов разветвления вычислительного процесса, а следовательно, и сложность структуры входных данных. По этой причине проблема создания надежного программного обеспечения в виде пакетов прикладных программ и систем автоматизированного проектирования (САПР) не может считаться удовлетворительно решенной без создания специализированных средств, обеспечивающих контроль правильности задания входной информации, удобство описания задачи для специалиста конкретной проблемной области и минимальность объема данных. В настоящей работе рассматриваются проблемно-ориентированный язык ЭЗОП (описание параметров экстремальных задач) и транслятор, являющиеся компонентами информационного обеспечения САПР ТОПАЗ, ориентированной на решение задач электро-, магнитостатики, электронной оптики изображающих ЭОС и плотных пучков ре-