

В. Т. АСТРЕЛИН, В. Я. ИВАНОВ

(Новосибирск)

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Введение. Разработка электронно-оптических систем с высокопоточными релятивистскими пучками существенно облегчается при использовании численных методов для расчета электрических полей и решения задачи распространения пучков заряженных частиц с учетом внешних и собственных электрических и магнитных полей. Вопросы численного моделирования пучков рассматривались в ряде работ. Наиболее полная библиография приведена в [1].

Описываемые ниже программы предназначены для решения стационарных задач в двумерных осесимметричных или плоскопараллельных случаях. Алгоритмы расчета характеристик электростатических полей основаны на методе интегральных уравнений теории потенциала с использованием сплайновой аппроксимации плотности поверхностных зарядов. Релятивистские уравнения в импульсной форме решаются с учетом всех компонент внешних и собственных полей пучка.

Рассматриваемый пакет программ является составной частью системы автоматизации машинного проектирования ТОПАЗ, разрабатываемой в настоящее время в Вычислительном центре СО АН СССР. Программные модули, составляющие данный пакет, позволяют решать следующие типы задач:

расчет электростатических потенциалов и полей системы электродов с заданными потенциалами при наличии границ раздела различных диэлектрических сред, условий симметрии и периодичности решения;

расчет полей системы электродов с заданными потенциалами либо полными зарядами на них (задача Робена);

расчет траекторий частиц различного типа во внешних электрических и магнитных полях с разными законами эмиссии частиц, их угловых и энергетических распределений;

расчет самосогласованных полей и траекторий интенсивных пучков заряженных частиц с учетом их объемного заряда и всех компонент собственного магнитного поля частиц в релятивистском случае.

Составными частями пакета являются транслятор с программно-ориентированного языка СЕЗАМ описания входных данных, алгоритмические модули расчета электростатических полей и траекторного анализа, а также система графической обработки выходной информации. Пакет имеет документацию в виде ИНФОРМАТОРА — руководства к пользованию системой, хранящегося во внешней памяти ЭВМ.

Постановка задачи. Полная система уравнений состоит из уравнений электростатического поля и системы уравнений движения заряженных частиц.

Потенциал электростатического поля φ определяется решением уравнения Пуассона

$$\Delta\varphi = -\rho/\varepsilon_0 \quad (1)$$

с граничными условиями 1-го

$$\varphi|_{S_1} = a(s) \quad (2)$$

и 2-го рода

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n}\Big|_{S_2} = b(s), \quad (3)$$

а также условиями на границе сред с различными диэлектрическими постоянными

$$\varepsilon_+ \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{s_+} = \varepsilon_- \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{s_-}. \quad (4)$$

Здесь ρ — плотность объемного заряда частиц пучка; ε_0 — электрическая постоянная вакуума; ε_+ , ε_- — относительные диэлектрические проницаемости сред; \mathbf{n} — вектор нормали к границе; $a(s)$, $b(s)$ — функции, заданные на границе.

Для расчета поведения частиц пучка в электромагнитных полях используется гидродинамическая модель «трубок тока» [2]. Расчет формы траекторий проводится решением релятивистских уравнений движения частиц:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{p}}{dt} &= Z(-\nabla\varphi + [\mathbf{v}\mathbf{B}]), \\ \mathbf{v} &= \mathbf{p}/m \sqrt{1 + \mathbf{p}^2/(mc)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \mathbf{p} — релятивистский импульс частицы с массой покоя m и зарядом Z ; \mathbf{v} и \mathbf{r} — ее скорость и координата соответственно; c — скорость света; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции. Начальные условия траекторий задаются на поверхности эмиттера S_0 :

$$\mathbf{r}|_{S_0} = \mathbf{r}_0, \quad \mathbf{v}|_{S_0} = \mathbf{v}_0.$$

Вклад каждой трубки тока в объемный заряд определяется из гидродинамического уравнения неразрывности, которое в стационарном случае имеет вид $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$ ($\mathbf{j} = \rho\mathbf{v}$ — плотность тока). Начальная плотность тока задается на поверхности эмиттера:

$$\mathbf{j}|_{S_0} = \mathbf{j}_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0, \varphi),$$

где величина \mathbf{j}_0 либо задается эмиссионной способностью эмиттера, либо определяется объемным зарядом пучка вблизи поверхности эмиттера, т. е. законом Богуславского — Ленгмюра

$$\mathbf{j}_0 = (4\sqrt{2}/9)(\varepsilon_0/\sqrt{m})(Z\delta\varphi)^{3/2}/Zd^2. \quad (6)$$

Здесь $\delta\varphi = \varphi_0 - \varphi$ — разность потенциалов эмиттера φ_0 и точки пространства φ , находящейся на некотором достаточно малом расстоянии d от поверхности эмиттера по нормали \mathbf{n} . Записанный в форме (6) закон эмиссии позволяет рассчитывать плотность тока для частиц различных типов.

Величина магнитной индукции в уравнениях движения (5) складывается из внешнего (заданного) поля \mathbf{B}_0 и собственного поля токовых трубок:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mathbf{B}_0(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_V \frac{[\mathbf{j}(\mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|^3} d^3r_1,$$

где μ_0 — магнитная постоянная вакуума. Интегрирование ведется по объему, занятому токами.

Методы численного решения. Для решения краевой задачи (1) — (4) используется интегральное представление потенциала

$$\varphi(\mathbf{r}) = \int_V \rho(\mathbf{r}_1) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) d^3r_1 + \int_S \sigma(\mathbf{r}_2) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_2) d^2r_2. \quad (7)$$

Здесь σ — неизвестная плотность поверхностных зарядов, а $G(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = = (4\pi\varepsilon_0 |\mathbf{R} - \mathbf{r}|)^{-1}$ — ядро интегрального представления.

Учет граничных условий (2)–(4) приводит к системе интегральных уравнений Фредгольма 1-го и 2-го рода относительно функции σ :

$$\begin{aligned} a(s) &= \int_V \rho(r_1) G(s, r_1) d^3r_1 + \int_S \sigma(r_2) G(s, r_2) d^2r_2, \\ b(s) &= \int_V \rho(r_1) \frac{\partial G}{\partial n} d^3r_1 + \int_S \sigma(r_2) \frac{\partial G}{\partial n} d^2r_2 + \delta\sigma(s), \\ \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{\varepsilon_+ + \varepsilon_-} \left(\int_V \rho(r_1) \frac{\partial G}{\partial n} d^3r_1 + \int_S \sigma(r_2) \frac{\partial G}{\partial n} d^2r_2 \right) + \delta\sigma(s) &= 0, \end{aligned}$$

где $\delta = \pi$ в плоскопараллельной геометрии и $\delta = 2\pi$ в аксиально-симметричном случае.

Проводя дискретизацию поверхности S и объема V и используя сплайновую аппроксимацию для плотности поверхностного заряда, получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно значений функции σ в узлах разбиений поверхности. Решение этой системы позволяет находить из (7) значения потенциала (и аналогично компонент электрического поля) в необходимых точках пространства.

В ряде физических систем могут присутствовать изолированные от источников проводящие тела, потенциал которых определяется их зарядами и взаимными емкостями. В таком случае граничные условия для соответствующих поверхностей имеют вид

$$\varepsilon_0 \oint_{S_n} (n \nabla \varphi) d^2r_2 = q_n, \quad n = 1, \dots, m$$

(q_n — заряды тел). Такая задача (так называемая задача Робена) решается следующим образом. Для нахождения потенциалов используется метод суперпозиционных функций, в результате чего определяются емкостные коэффициенты и потенциалы тел с заданными зарядами. Затем находится искомое решение краевой задачи с вычисленными потенциалами поверхностей.

Решение уравнений движения частиц проводится в аксиально-симметричном случае. Здесь $r = (r, \Theta, z)$, $v = (v_r, v_\Theta, v_z)$, $p = (p_r, p_\Theta, p_z)$, и система уравнений (5) принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{p}_r &= p_\Theta \dot{\Theta} + Z(E_r + v_\Theta B_z - v_z B_\Theta), \\ \dot{p}_\Theta &= -p_r \dot{\Theta} + Z(v_z B_r - v_r B_z), \\ \dot{p}_z &= Z(E_z + v_r B_\Theta - v_\Theta B_r). \end{aligned} \quad (8)$$

В случаях, когда при расчете учитываются только заданные внешние поля (B_z^0 — однородная магнитная индукция либо индукция, заданная своим осевым распределением $B_0(z)$), для вычисления азимутальной компоненты импульса p_Θ используется релятивистский аналог теоремы Буша [3]

$$p_\Theta = [Z(\Psi - \Psi_0)/2\pi + r_0 p_{\Theta 0}]/r,$$

где Ψ — магнитный поток через круг радиусом r ; Ψ_0 , r_0 , $p_{\Theta 0}$ — начальные данные для траектории. Если же магнитное поле задано внешними источниками тока или учтены B_r , B_z — компоненты собственного поля токов, то для расчета траекторий используется система (8).

Электрические и магнитные поля насчитываются в узлах сетки, покрывающей область движения частиц, и для каждой точки траектории проводится линейная интерполяция полей. Используется следующая схема интегрирования уравнений движения:

$$r_{n+1/2} = r_n + \tau v_n/2,$$

$$p_{n+1} = p_n + \tau \dot{p}(r_{n+1/2}, E_{n+1/2}, B_{n+1/2}),$$

$$v_{n+1} = \frac{p_{n+1}}{m \sqrt{1 + \frac{p_{n+1}^2}{(mc)^2}}},$$

$$r_{n+1} = \tau v_{n+1} + r_n.$$

Здесь τ — шаг интегрирования траектории — выбирается автоматически пропорциональным шагу сетки.

Вопрос о точности счета такой разностной схемы рассматривался в работе [4], где показано, что использование релятивистских уравнений движения в импульсной форме существенно уменьшает счетные погрешности при $v \sim c$ по сравнению с традиционно используемыми уравнениями для координат и скоростей.

Процесс разбиения пучка на токовые трубки проводится следующим образом. Поверхность эмиттера разбивается на элементарные площадки ΔS_i , и из центра каждой площадки выпускается траектория с током $I_i = j_0 \Delta S_i$. Начальная энергия и направление движения частиц задаются, или же начальная энергия вычисляется по величине потенциала, а направление движения берется по нормали к поверхности эмиттера.

Вычисление вклада тока траектории в объемный заряд, азимутальную компоненту магнитной индукции B_θ и в азимутальную компоненту тока $I_\theta = I_i \rho_\theta / |p|$ проводится на каждом шаге интегрирования. После расчета всех траекторий вычисляются электрические и магнитные поля в узлах пространственной сетки.

Решение задачи проводится методом последовательных приближений. При этом ток каждой трубки, дающий вклад в заряд и магнитную индукцию на i -итерации, вычисляется по формуле

$$I^{(i)} = \omega_i I_i + (1 - \omega_i) I^{(i-1)},$$

где ω_i — заданная последовательность коэффициентов релаксации тока пучка. Расчет продолжается до тех пор, пока форма и токи траекторий двух последовательных итераций не станут достаточно близкими.

Структура пакета и организация данных. В целях более эффективного использования машинных ресурсов алгоритмические модули пакета объединены в несколько секций, работающих в режиме динамической загрузки памяти. Среди них можно выделить секцию обработки входной информации, вычислительный сегмент и секцию обработки результатов расчетов.

Наличие проблемно-ориентированных языков [5] описания входных данных позволяет осуществлять надежный контроль правильности задания информации, обеспечивает наглядность представления и уменьшает объем вводимой информации. По назначению данные можно разбить на 3 группы: описания краевой задачи, начальных данных для пучков заряженных частиц и указания о форме выдачи результатов вычислений. Для краевой задачи входной язык СЕЗАМ позволяет задавать концевые точки и топологию контура границы, состоящей из отрезков прямых, дуг окружностей, эллипсов или задаваемой поточечно и аппроксимируемой сплайном кривой. Кроме того, указывается информация о системе физических единиц, определяемой пользователем, наличии симметрии и периодичности решения, граничных условиях и параметрах дискретизации краевой задачи.

Начальные данные для заряженных частиц имеют следующую структуру: эмиттирующие поверхности разбиваются на «фронты», характеризующиеся однородностью информации для частиц заданного фронта (сорт частиц, их координаты и скорости, режим эмиссии, количество угловых и энергетических групп, моделирующие соответствующие функции рас-

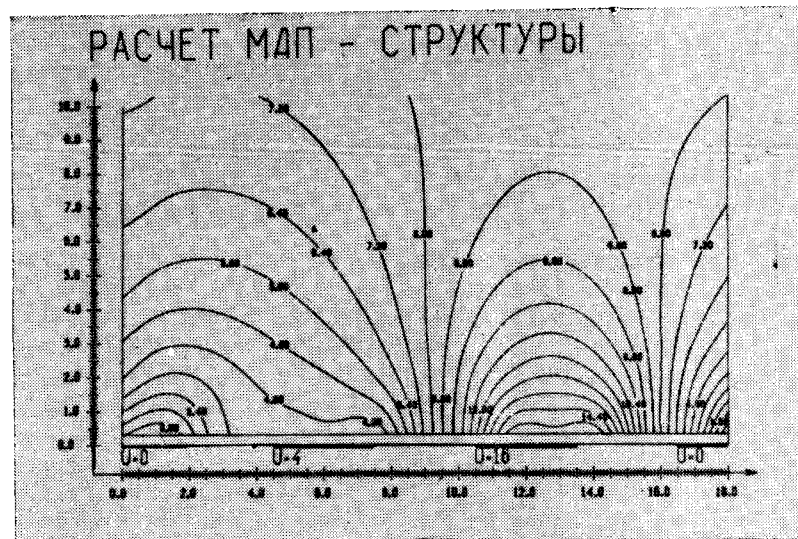


Рис. 1. Картина эквипотенциальных поверхностей периодической структуры «металл — диэлектрик — полупроводник».

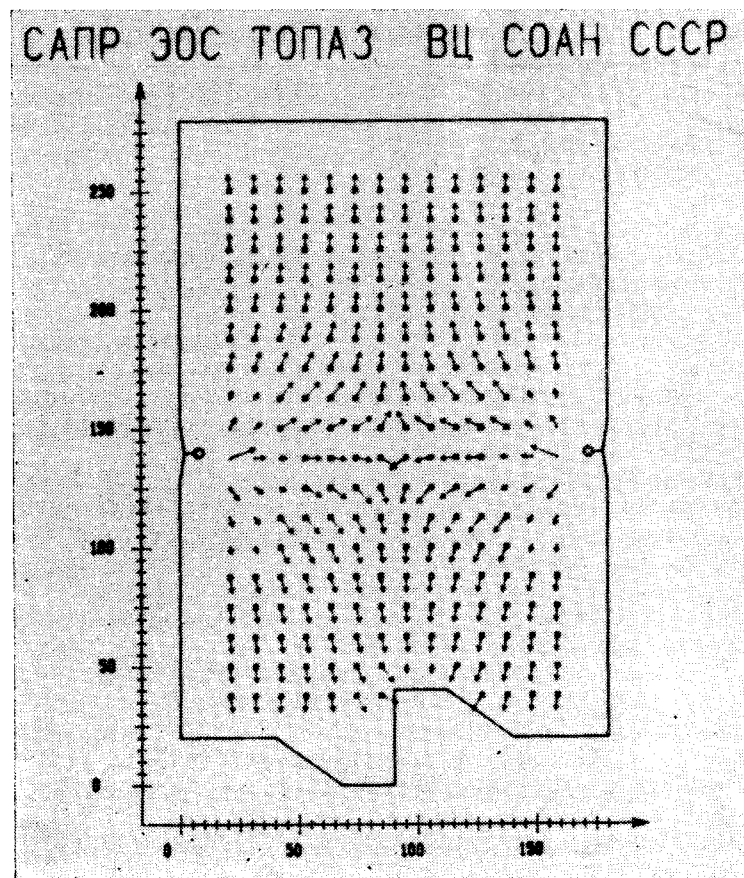


Рис. 2. Силовые линии электростатического поля в разряднике ножевого типа.

пределения). Кроме того, необходимо описать параметры сетки для объемных зарядов, токов и компонент магнитного поля. При этом внешние магнитные поля задаются либо осевым распределением индукции $B_0(z)$, либо распределением возбуждающих токов. Управляющие параметры позволяют также определить выбор типа используемого приближения модели: учет объемного заряда и компонент магнитного поля пучка.

Информация о форме вывода результатов счета задается как для печати на АЦПУ, так и для разрисовки с помощью графопостроителя в определенных стандартных форматах. Она касается распечатки массивов компонент полей и объемного заряда, траекторий, эквипотенциалей, силовых линий и некоторых функционалов: полного тока, первеанса и пр. Существует целая система признаков избирательного управления выводом — так называемого «разрежения информации». Можно задавать разрежения печати нелинейных итераций, фронтов, угловых и энергетических групп, траекторий и отдельных точек траекторий. Примеры вывода результатов счета на графопостроитель показаны на рис. 1—4.

В связи с особой важностью проблемы использования оперативной памяти для массивов большого объема при реализации алгоритмов на ФОРТРАНе рассмотрим решение этого вопроса в данном пакете. В управляющей секции в COMMON-области описан массив, занимающий практически всю память, за исключением некоторой части, необходимой для размещения программного кода. В секции ввода на основе анализа входных данных вычисляются базовые адреса только тех массивов, которые будут применяться в данном конкретном варианте счета, и проводится контроль выхода за границы допустимой области памяти. Таким образом, здесь не используются статические описания массивов и сложный контроль за границей индексов для каждого из них. Невозможность выхода на счет возникает лишь при нехватке памяти для всех массивов в целом, а не для любого из них, как это было бы при статических описаниях.

Экономичное использование памяти достигается также упаковкой пары чисел в одну ячейку памяти. В программах упаковка применяется

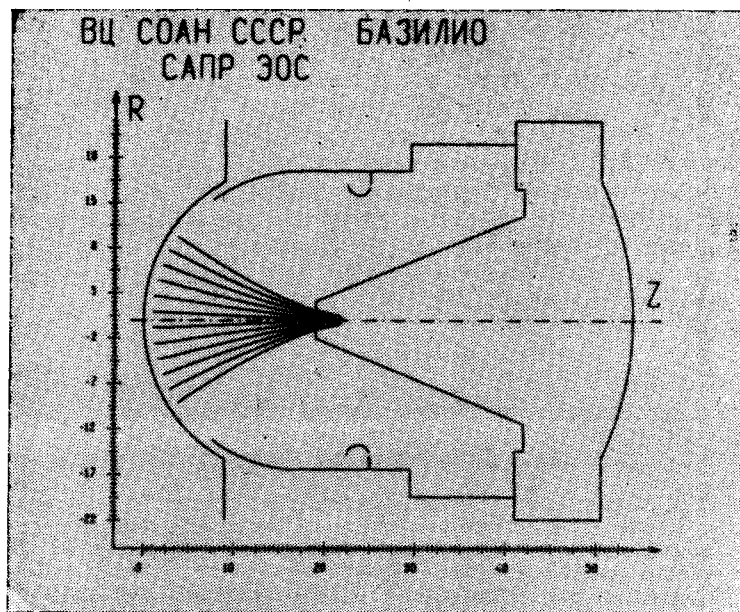


Рис. 3. Траектории электронов в системе электростатической фокусировки пучка.

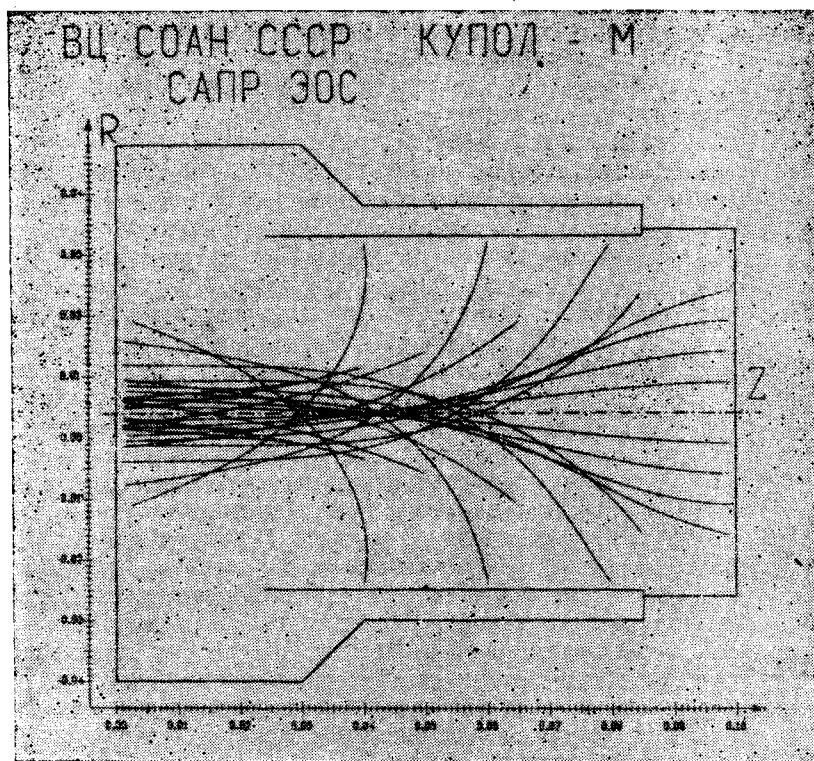


Рис. 4. Траектории ионов, бомбардирующих фотокатод.

для массивов компонент электрических полей и объемного заряда частиц.

Все модули, реализующие численные алгоритмы, написаны на ФОРТРАНе, трансляторы с проблемно-ориентированных входных языков — на АЛГОЛе-ГДР, имеющем аппарат работы со строковыми и битовыми величинами. Незначительная часть модулей написана на автокоде МАДЛЕН для обеспечения максимального быстродействия. Общий объем пакета составляет около 3700 перфокарт. Из библиотечных программ используется базовое математическое обеспечение графопостроителей — система СМОГ. Следует отметить, что пакет прошел тщательную многолетнюю проверку как на методических задачах, позволяющих оценить точность и быстродействие алгоритмов, так и на расчетах достаточно сложных и разнообразных по характеру практических задач электростатистики и электронной оптики интенсивных электронно-ионных релятивистских пучков [6—8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск, Наука, 1974.
2. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. Л., Энергия, 1972.
3. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. М., Сов. радио, 1966.
4. Иванов В. Я., Хавин Н. Г. Численное решение уравнений движения релятивистских заряженных частиц в самосогласованных полях.—Препринт № 129. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1978.
5. Иванов В. Я. Входные языки системы ТОПАЗ.—Препринт № 154. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1979.
6. Астрелин В. Т., Лагунов В. М., Соболев О. П. Расчет электрических полей в системах с водной изоляцией.—Препринт № 27. Новосибирск, изд. ИЯФ СО АН СССР, 1976.

7. Иванов В. Я., Хавин Н. Г. Численный метод расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц.— Препринт № 114. Новосибирск, изд. ИЯФ СО АН СССР, 1977.
8. Иванов В. Я. Автоматизация машинного проектирования приборов электроники.— Препринт № 40. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1977.

Поступила в редакцию 13 июля 1979 г.

УДК 681.327.12

Г. П. АПАРИН, В. Н. САМУЙЛОВА
(Минск)

УНИВЕРСАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА КОДИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ФОРМ ГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ПЛАНШЕТНОГО КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Трудности полной автоматизации кодирования и ввода в ЭВМ сложных форм графической информации в виде чертежей, карт, схем и т. п., а также широкое распространение человеко-машинных интерактивных систем графического взаимодействия обусловили появление и развитие полуавтоматических планшетных координатно-измерительных устройств (КИУ), которые, не ограничивая сложности кодируемой чертежно-графической (ЧГ) информации, ее разнотипности и размеров носителя, позволили по-новому ставить и решать широкий круг задач при автоматизации экспериментальных и проектно-конструкторских работ в различных областях науки и техники [1, 2].

Эргатический характер использования планшетных КИУ с применением проблемно-ориентированного языка высокого уровня для описания ЧГ-информации и их комплексирование с ЭВМ и средствами кодирования символической и функциональной информации определяют возможность существенного снижения избыточности вводимой в ЭВМ информации за счет эффективного использования человеческого звена и рационального распределения функций между ним и аппаратурно-программным комплексом эргатической подсистемы подготовки графических данных (ПГД) [3]. На человека в такой подсистеме возлагаются очень простые для него функции анализа, распознавания и выделения крупных фрагментов ЧГ-информации с их характеристиками и существенными взаимосвязями и их кодирование в базисе проблемно-ориентированного языка, а наиболее подверженные субъективным факторам процессы измерения и преобразования координат реализуются автоматически планшетным КИУ.

Прямой подбор и агрегатирование комплекса из известных технических средств в соответствии с требуемым набором функциональных возможностей не могут дать эффективной реализации подсистемы, прежде всего, по таким важнейшим критериям, как эргономичность E , гибкость G , производительность P , надежность N и стоимость S .

Поэтому в последнее время наряду с интенсивными поисками в направлении разработки новых перспективных планшетных КИУ [2, 4] ведутся также интенсивные поиски методов их более эффективного использования в различных эргатических подсистемах ПГД [2, 5—8], спо-