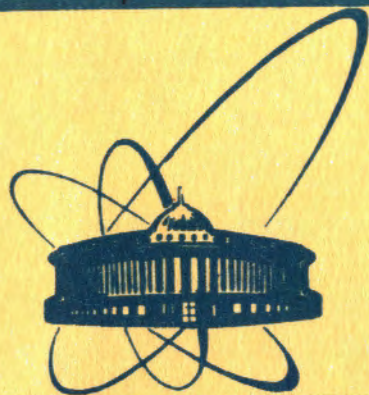


2755/2-80

23/VI-80



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

10-80-169

Б.В.Василишин, В.И.Волков, И.И.Куликов

ИНТЕРАКТИВНАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТА  
КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ  
ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЭВМ ЕС-1010

1980

Для расчета каналов транспортировки заряженных частиц на ЭВМ БЭСМ-6 и CDC-6500 в ОИЯИ поставлено несколько эффективных программ, например, /1/, позволяющих получать такие значения параметров системы транспортировки, заданных в качестве варьируемых, которые обеспечивают выполнение условий, накладываемых на характеристики пучка в определенных точках канала. Однако при большом числе условий и соответственно большом числе варьируемых параметров, что, как правило, имеет место в каналах транспортировки, часто оказывается, что соответствующая программа не в состоянии подобрать решение, обеспечивающее выполнение заданных условий. Для нахождения решения приходится вначале снимать часть условий, накладываемых на пучок, и поочередно фиксировать некоторые из варьируемых параметров. Кроме того, необходимо выполнить предварительную работу по первоначальному выбору одного или нескольких вариантов построения системы и определению степени влияния тех или иных параметров на характеристики пучка. При подобных расчетах интуицию и опыт вычислителя нельзя полностью заменить какой-либо программой, и наилучший эффект достигается, когда при управлении расчетом человек опирается на помощь вычислительного устройства. Таким образом, для такой задачи наиболее эффективной является интерактивная программа, обеспечивающая:

1. Быстрый ввод значений параметров системы и характеристик пучка на входе в канал транспортировки.
2. Быстрый расчет функций, характеризующих пучок /дисперсия, ее производная,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ , огибающие и т.д./, с выводом их в графическом виде /например, на графический дисплей/ и с немедленным изменением вводимых параметров или начальных условий, что крайне важно для понимания свойств системы. При этом эффективность расчета повышается не только благодаря вмешательству человека в процесс вычислений, но и потому, что, воспринимая информацию о рассчитываемой системе в графическом виде, вычислитель лучше понимает процессы, происходящие в системе, чувствует взаимосвязь и взаимное влияние элементов и, как следствие, быстрее находит путь к конечному результату. Для указанных целей не требуется ЭВМ с большим объемом памяти и высоким быстродействием, так как количество вычислений сравнительно невелико. Необходимым условием является лишь соответствующий набор внешних устройств /графический дисплей, телетайп, печатающее устройство и др./.

В настоящей работе описывается решение задачи по расчету систем транспортировки пучков заряженных частиц на базе ЭВМ ЕС-1010 и ВТ-1010Б, имеющих следующие характеристики и основной набор внешних устройств:

1. Емкость ОЗУ ЭВМ ЕС-1010 и ВТ-1010Б соответственно 64 К и 16 К байтов.
2. Магнитный диск ЭВМ ЕС-1010 емкостью 800 К байтов.
3. Алфавитно-цифровые дисплеи "Видеотон-340".
4. Графический дисплей ГД-71.
5. Графопостроитель НР-7210 А.
6. Алфавитно-цифровое печатающее устройство ЕС-7184.
7. Телетайпы ASR-33.
8. Накопители на магнитной ленте НМЛ-67.

Указанный двухмашинный комплекс в настоящее время используется для контроля и управления параметрами системы медленного вывода пучка из синхрофазотрона<sup>/2/</sup>. Однако во время стоянок синхрофазотрона, а также при неполной загрузке комплекса в некоторых режимах работы ускорителя, наряду с выполнением задач управления, возможно использование комплекса и для других целей /мультипрограммный режим работы во втором случае/.

#### ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММЫ

Входными величинами программы, задаваемыми в режиме диалога, являются параметры, описывающие структуру канала транспортировки, и характеристики пучка на входе системы. Структура канала определяется числом элементов  $N$  и четырьмя массивами параметров элементов:

##### 1. Массив идентификаторов элементов (IN)

В этом массиве приняты следующие обозначения: 0 - свободное пространство, 1 - квадрупольная линза, 2 - дипольный секторный магнит, 3 - краевой угол магнита, 4 - дипольный магнит, отклоняющий от оптической оси канала траекторию центральной частицы /бамп-магнит/. При повороте в вертикальной плоскости значения идентификаторов 2, 3 и 4 задаются со знаком минус.

##### 2. Массив количества разбиений каждого элемента (IP)

Программа допускает выдачу результатов не только на входе и выходе каждого элемента, а также и в заданном числе точек внутри элемента. Число  $IP(i)$  этого массива показывает, на какое число равных отрезков разбивается  $i$ -й элемент массива. В реализованном варианте задачи общее число разбиений не должно превышать 40, но возможно его увеличение до ~150.

##### 3. Массив длин элементов (DI)

Длина элементов в этом массиве задается в см. Для краевого угла задается его величина в радианах.

##### 4. Массив (F) полей /градиентов/

Для квадрупольных линз в этом массиве задаются градиенты в Гс/см, для остальных элементов, в том числе краевых углов, - значение поля в Гс. Величина поля дипольного магнита задается со знаком плюс, если координата центра кривизны поворота отрицательна. Поле бамп-магнита считается положительным, если траектория в нем отклоняется в положительном направлении. Градиент дефокусирующей по горизонтали линзы принимается отрицательным. Для свободного промежутка значение соответствующего элемента этого массива игнорируется.

В реализованном варианте программы число элементов  $N$  равно 25, но может быть увеличено до ~50. Предусмотрена возможность получать характеристики не только для монозарядного, но также для двух- или трехзарядного пучка. В этом случае все функции, вычисляемые с помощью программы, получаются для каждой из зарядностей.

В качестве входных параметров, описывающих пучок, задаются следующие:

1. Число зарядностей  $NQ$  ( $NQ \leq 3$ ).

2. Центральная зарядность  $Q_0$ .

3. Массив зарядностей  $Q(\ell)$ ,  $\ell \leq 3$ .

4. Магнитная жесткость  $BR$  в Гс.см для центральной зарядности. Предполагается, что частицы разных зарядностей имеют одинаковую энергию и различные  $BR$ .

5. Дисперсия пучка  $D(i, \ell, 1)$  в см. Здесь и ниже приняты следующие обозначения: значение первого индекса  $i = 1$  показывает, что соответствующая величина /в данном случае дисперсия/ относится к горизонтальной плоскости, для вертикальной плоскости  $i = 2$ ; значение второго индекса  $\ell$  ( $\ell \leq 3$ ) показывает номер зарядности в массиве  $Q(\ell)$ , к которой относится задаваемая величина; значение третьего индекса показывает номер точки  $k$  внутри системы транспортировки, к которой данная величина относится /в данном случае  $k = 1$  означает, что величина дисперсии задается в первой точке, т.е. на входе в канал/.

6.  $D1(i, \ell, 1)$  - производная дисперсии.

7.  $E(i, \ell)$  - эмиттанс в см.рад.

8.  $B(i, \ell, 1)$  -  $\beta$ -функция в см.

9.  $A(i, \ell, 1)$  -  $\alpha$ -функция.

10.  $X1(i, \ell, 1)$  - положение осевой траектории в см для каждой из рассматриваемых зарядностей.

11.  $X1(i, \ell, 1)$  - угол между осевой траекторией и осью канала, в радианах.

12.  $DP$  - импульсный разброс  $\Delta P/P_0$ . Предполагается, что  $\Delta P/P_0$  одинаково для всех рассматриваемых зарядностей.

- вертикальный масштаб при построении огибающих пучка; продольный масштаб при построении изображений выбирается автоматически исходя из длины канала.

Вычислительная часть программы сосредоточена в подпрограмме COUNT, которая обращается к подпрограммам SPACE, MAGX, MAGZ, BUMPX, BUMPZ, EDGEX, EDGEZ, LENSE, написанным на языке FORTRAN ЭВМ ЕС-1010 и вычисляющим матрицы преобразования соответствующих элементов. В подпрограмме COUNT вычисляются следующие функции:  $D(i, \ell, k)$ ,  $D1(i, \ell, k)$ ,  $B(i, \ell, k)$ ,  $A(i, \ell, k)$ ,  $G(i, \ell, k)$  -  $\gamma$ -функция в см<sup>-1</sup>,  $XI(i, \ell, k)$ ;

$$XP(i, \ell, k) = XI(i, \ell, k) + |D(i, \ell, k)| \cdot DP + \sqrt{E(i, \ell) \cdot B(i, \ell, k)};$$

$$XN(i, \ell, k) = XI(i, \ell, k) - |D(i, \ell, k)| \cdot DP - \sqrt{E(i, \ell) \cdot B(i, \ell, k)};$$

$$XM(i, 1, k) = \max_{\ell=1,2,3} \{XP(i, \ell, k)\};$$

$$XM(i, 2, k) = \min_{\ell=1,2,3} \{XN(i, \ell, k)\};$$

$$T11(i, \ell, k), T12(i, \ell, k), T21(i, \ell, k), T22(i, \ell, k) -$$

значения элементов матрицы перехода от входа в канал до точки  $k$ .

Функции  $XI$ ,  $XP$ ,  $XN$ ,  $XM$  представляются на графике в соответствии с заданным масштабом SC. Остальные функции перед построением нормируются, при этом на графике выдается таблица максимальных значений  $A$ ,  $B$ ,  $G$ ,  $D$  и  $D1$  в обеих плоскостях  $X$  и  $Z$ .

#### РАБОТА ПРОГРАММЫ

Выполнение программы после ее загрузки в ОЗУ и запуска начинается с подготовки 18-го уровня прерывания ЭВМ ЕС-1010 для работы программ IT18LP и IT18FK, обслуживающих соответственно световой карандаш и функциональную клавиатуру графического дисплея. Далее происходит автоматический переход в режим диалога /рис.1/, в котором с операторской консоли /телетайп или алфавитно-цифровой дисплей/ задаются входные параметры программы. Выбор необходимого параметра осуществляется на основе заданного наименования или порядкового номера. Для удобства оператора ввод дополнительных данных, характеризующих выбранный параметр /например, номера элемента массива, значения указателя координатной плоскости, значения параметра/, производится в режиме

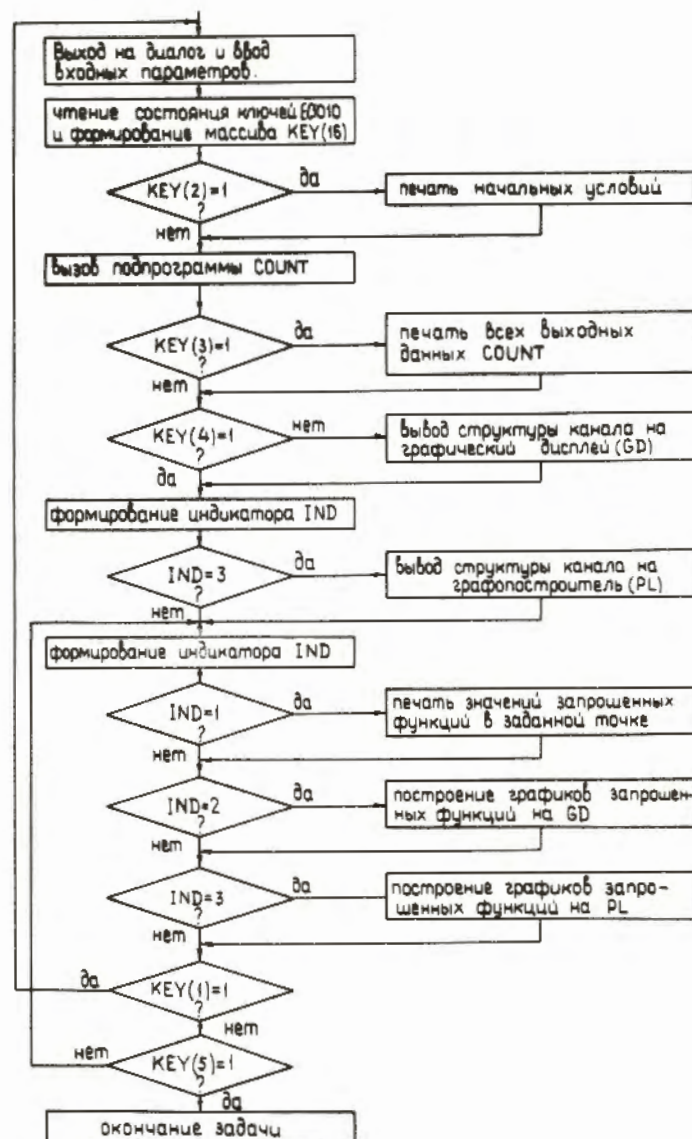


Рис.1. Блок-схема программы.

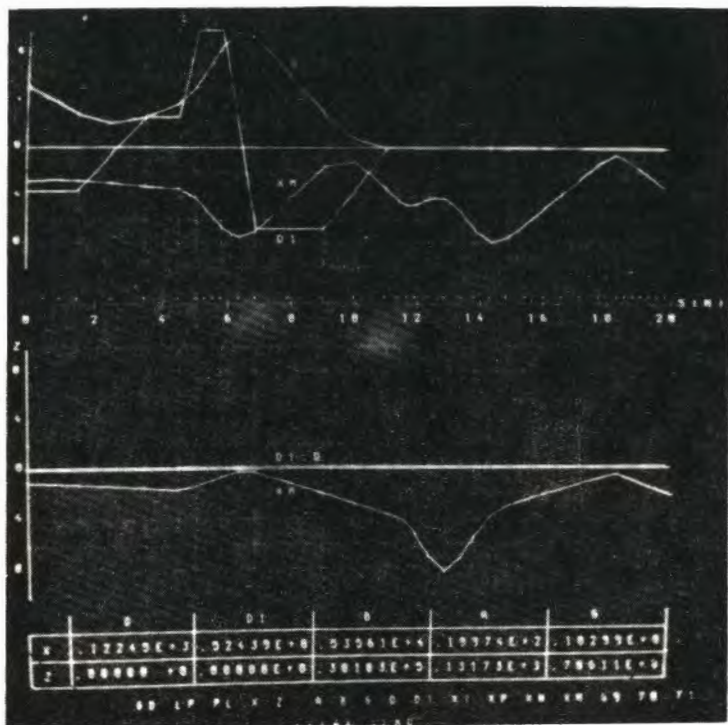


Рис.2. Изображение дисперсии (D), ее производной (D1) и огибающей для всех зарядностей (XM) на экране графического дисплея.

ответов на вопросы ЭВМ. Для управления процессом диалога используются специальные символы: "←" - отмена L последних введенных символов /по числу L символов "←"/, "↑" - переход к вводу следующего параметра, "CR" - конец ввода значения параметра. На практике расчет нескольких вариантов одного и того же канала занимает относительно длительное время. Каждый новый вариант, как правило, требует модификации небольшого числа параметров. Чтобы при каждом запуске программы не повторять ввод всех входных параметров с операторской консоли, в программах предусмотрена возможность их ввода /вывода/ с перфоленты /на перфоленту/. В режиме диалога предусмотрены также возможности включения в структуру нового элемента или исключения какого-либо элемента из структуры, облегчающие переход к

|         |  |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |    |
|---------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| адрес   | 15   | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9  | 8  | 7  | 6   | 5   | 4   | 3   | 2  | 1  | 0  |
| &330/ZC | 70   | 69 | XM | XN | XP | X1 | D1 | PL | LP | GD  | D   | G   | B   | A  | Z  | X  |
| &332/ZC |  |    |    |    |    |    |    |    |    | T22 | T21 | T12 | T11 | X1 | CL | 71 |
| &334/ZC | первый свободный адрес в памяти ВТ1010Б для построения графика                               |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |    |
| &336/ZC | номер точки, указанной световым карандашом для построения в ней значений запрошенных функций |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |    |

Рис.3. Структура командного слова GD и используемой области памяти ZC.

расчету другого варианта канала. После выхода из режима диалога по символу " / " управление процессом расчета производится с помощью периферийных устройств графического дисплея /светового карандаша или функциональной клавиатуры/ и ключей инженерного пульта ЕС-1010. По состоянию 12-го ключа пульта "единица" на экран ГД-71 выводятся изображение структуры канала и таблица команд, высвечиваемая в нижней части экрана /рис.2/. Для вызова изображений функций необходимо с помощью светового карандаша указать в таблице их идентификаторы, координатную плоскость, зарядность и идентификатор устройства отображения. При этом адреса идентификаторов таблицы передаются из ЭВМ ВТ-1010Б в ОЗУ ЕС-1010, на основе которых программа IT18LP формирует командное слово GD и по команде "SEND" размещает его в зоне общих данных ОЗУ (ZC) по адресам &330÷&332 /рис.3/. При правильном приеме команды соответствующий идентификатор в таблице подчеркивается. Для распечатки значений функций в определенных точках канала на экране ГД-71 под горизонтальной масштабной шкалой высвечивается совокупность точек разбиения элементов /рис.2/. При указании световым карандашом на соответствующую точку в ЕС-1010 передается адрес ее расположения в памяти ВТ-1010Б, на основе которого определяется порядковый номер точки и записывается в зону ZC по адресу &336. Записанная в зону ZC информация анализируется соответствующими подпрограммами и в виде массивов передается организующей подпрограмме, написанной на FORTRANе, которая инициирует выполнение затребованных операций. Состояние "единица" ключей 14 и 13 вызывает выдачу на АЦПУ соответственно входных данных и всех результатов расчета. При расчете канала требуется, как правило, вывод изображений одних и тех же функций. Для того, чтобы после каждой модификации какого-либо параметра не повторять запросы на выдачу результатов, в программе предусмотрена возможность автоматического

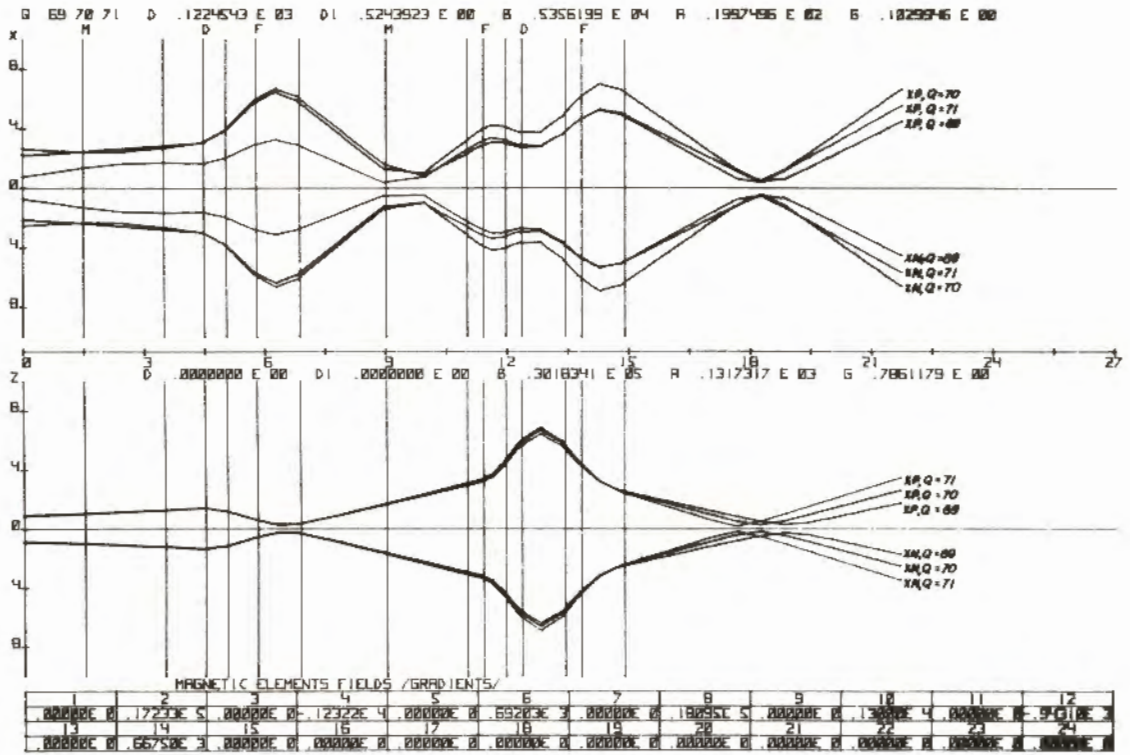


Рис.4. Пример выдачи на графопостроитель огибающих каждой из зарядовых компонент пучка.

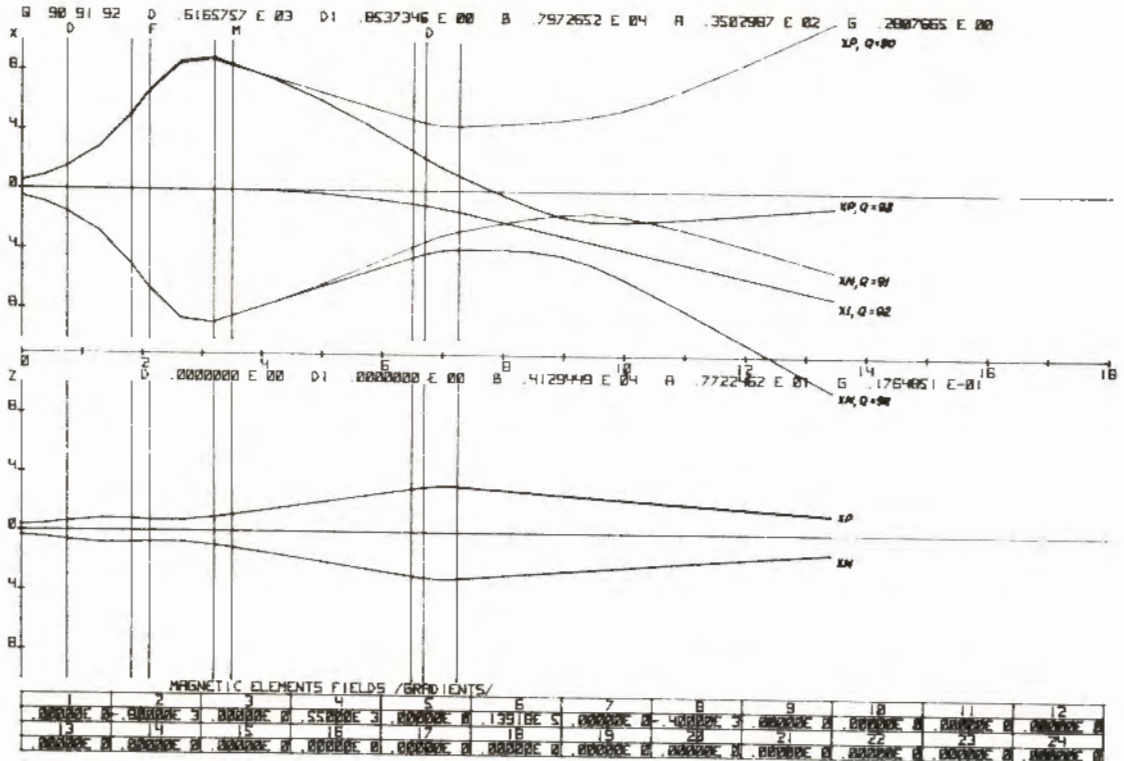


Рис.5. Вариант участка separации зарядовой компоненты пучка Q = 92 для перевода в синхрофазотрон.

вывода результатов на основе запроса, сделанного один раз. Этот режим реализован по состоянию "единица" 10-го ключа пульта ЕС-1010. Вход в режим диалога по завершении расчета значений всех функций и вывода затребованных результатов на устройстве отображения производится по состоянию "единица" 15-го ключа пульта. В противном случае программа переходит в циклический режим анализа состояния ключей пульта ЕС-1010 и командного слова GD и выполнению соответствующих операций. Программы представления информации и диалога написаны на языке ASSEMBLER ЭВМ ЕС-1010.

При работе с функциональной клавиатурой значения команд таблицы приписываются определенным кнопкам клавиатуры. Выполнение какой-либо операции инициируется нажатием соответствующих кнопок. В остальном работа с функциональной клавиатурой аналогична работе со световым карандашом.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА КАНАЛА

В качестве примера, иллюстрирующего возможности программы, на рис. 2, 4, 5 и 6 приведены результаты расчета двух участков одного из вариантов системы перевода многозарядного пучка из ТИСа в синхрофазотрон в рамках проекта УКТИ<sup>1/3/</sup>. Рассматривался выводимый из ТИСа пучок ионов урана с зарядностями 69, 70 и 71. На первом этапе перевода с целью получения ядер урана, необходимых для инжекции в синхрофазотрон, производится обдирка пучка ионов на перезарядной мишени. При этом, чтобы свести к минимуму увеличение эмиттанса после перезарядки, необходимо выполнить следующие условия:

1/ дисперсионная функция и ее производная на участке перезарядки должны быть равны нулю;

2/ пучок должен быть сфокусирован на перезарядной мишени с минимальным размером в обеих плоскостях.

Этим условиям удовлетворяет система, приведенная на рис. 2, где представлены изображения функций D, D1 и XM с экрана графического дисплея. Вертикальные линии на рисунке показывают вход и выход каждого элемента структуры. Обозначения M, F, D, приведенные над элементами структуры, показывают тип элемента /соответственно поворотный магнит, фокусирующую и дефокусирующую линзы/. На рис. 4, иллюстрирующем пример выдачи результатов на графопостроитель, представлены огибающие XP, XN для каждой из зарядовых компонент пучка в отдельности. Показанные на рисунке хроматические aberrации приведут к существенному увеличению эмиттанса пучка при перезарядке. Чтобы этого избежать, необходимо установить на участке системы, где дисперсия отлична от нуля, две секступольные линзы, компенсирующие эти

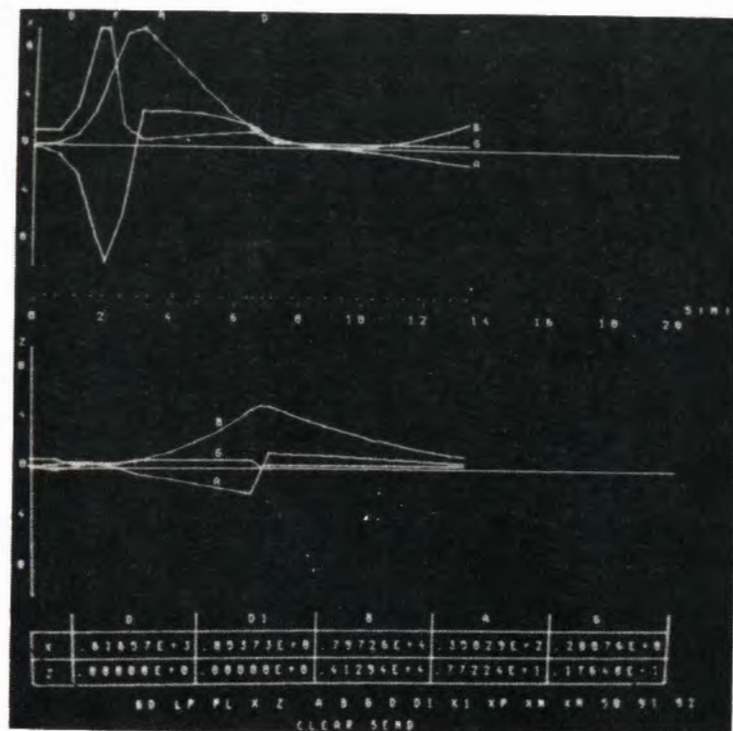


Рис. 6. Изображение функций A, B и G на участке сепарации.

абerrации. На рис. 5 показан следующий участок системы перевода, на котором производится отделение полностью ионизированной компоненты пучка (G = 92). На рис. 6 приведены функции A, B, G для этого участка. Расчет каждого из них потребовал 4-5 часов работы на ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Brown K.L. et al. CERN, 73-16, 1973.
2. Chernykh E.V. et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1977, v. NS-24, No.6, p.2561.
3. Балдин А.М. и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов. ОИЯИ, 9-11796, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 февраля 1980 года.