



ЕФ

Препринт ЕФН-1300(86)-90

**ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ**  
**ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**  
**YEREVAN PHYSICS INSTITUTE**



**С.Г. АНАНЯН, Р.О. МАНУКЯН**

**О ПОСТРОЕНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
НАСТРОЙКИ ТРАКТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ**

**ЦНИИатоминформ**  
**ЕРЕВАН-1990**

**Ս.Հ.ԱՆԱՆՑԱՆ, Ո.Հ.ՄԱՆՈՒԿՑԱՆ**

**ՊԵՏԵՐԻ ՏԵՂԱՓՈՒՄԱՆ ՏՐԱԿՏԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ԾՐԱԳՐԱՑԻՆ  
ԱՊԱՀՈՎՄԱՆ ՍՏԵՂՄԱՆ ՄԱՍԻՆ**

Առաջարկվում է ծրագրային միջոցների համալիր՝ լիցքավորված մասնիկների փեջերի տեղափոխման տրոսկտերի ավտոմատացված ղեկավարման համար ժամանակակից արագացուցչա-կուտակիչային համալիրներում: Նրա արդյունավետությունը ցույց է տրված նմանակման մոդելավորման արդյունքներով՝ «Պետրա»-ից «Ներա» էլեկտրոնների տեղափոխման տրանսի-օրիտակի վրա:

**Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ  
Երևան 1990**



Preprint YERPHI-1300(86)-90

S.G.ANANIAN, R.O.MANUKIAN

ON SOFTWARE FOR AN AUTOMATED TUNING OF BEAM TRANSPORT

A software package for realization of an automated control of charged particles beam transport in modern storage accelerator complexes is suggested. The performance is demonstrated by the results of simulation of the electrons transport from "PETRA" to "HEGRA".

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1990

Препринт ЕФИ-1300(86)-90

УДК 519.283:621:3.038.615

С.Г. АНАНЯН, Р.С. МАНУКЯН

**О ПОСТРОЕНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
НАСТРОЙКИ ТРАКТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ**

Предлагается комплекс программных средств для реализации автоматизированного управления трактами транспортировки пучков заряженных частиц в современных ускорительно-накопительных комплексах. Эффективность его демонстрируется результатами имитационного моделирования на примере тракта транспортировки электронов из "Петры" в "Геру"

Ереванский физический институт  
Ереван 1990

## ВВЕДЕНИЕ

Применение традиционной ручной настройки трактов транспортировки пучков по информации на мониторах положения с увеличением протяженности трактов и количества магнитных элементов становится все менее эффективным. Поэтому все более широко используются автоматизированные методы управления с вычислительными ресурсами в цепи обратной связи [1].

В настоящей работе описан комплекс программных средств предназначенный для реализации автоматизированного управления трактами транспортировки пучков заряженных частиц в современных ускорительно-накопительных комплексах.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть  $A(i)$  – матрицы перехода между мониторами  $i$  и  $i+1$ , а  $B(i)$  – матрицы влияния корректоров на пучок, которые расположены в интервале между этими мониторами. Если  $x(i)$  – вектор состояния пучка на  $i$ -ом мониторе, компонентами которого являются  $r$  и  $z$ -координаты пучка и их производные, то имеем:

$$\dot{x}(i+1) = A(i)x(i) + B(i)u(i), \quad i=0, 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $u(i)$  – вектор, компонентами которого являются управляющие воздействия корректоров.

Обычно с помощью мониторов  $r, z$ -координаты пучка измеряются с некоторой погрешностью. Поэтому вектор наблюдения на  $i$ -ом мониторе имеет следующий вид:

$$Z(i) = H(i)x(i) + V(i), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

где  $H(i)$  - матрица выделения координатных компонент вектора состояния,  $V(i)$  - погрешности измерений.

Рассмотрим несколько вариантов математической формулировки задачи оптимальной настройки тракта в зависимости от последовательности процессов наблюдения.

1. Предположим, что при последовательном измерении координат пучка  $Z(i)$ ,  $i=0, 1, 2, \dots, n$ , после съема информации на  $k$ -ом мониторе, желательно выбрать значение  $U(k)$ . Если в качестве критерия оптимальности  $U(k)$  принять решение задачи минимизации

$$J = |x(n)|_S^2 + \sum_{k=1}^n [ |x(k)|_D^2 + |U(k)|_R^2 ] \quad (3)$$

при ограничениях (1), (2), то сформулированная задача сводится к известной проблеме совместной оценки и управления [3].

Оптимальное уравнение при этом имеет вид:

$$U(k) = -L(k)x(k), \quad (4)$$

где матрица коэффициентов  $L(k)$  определяется решением некоторого матричного уравнения Рикатти в обратном времени, а  $x(k)$  - оценка вектора состояния, формируемого фильтром Калмана.

Если имеющаяся априорная информация недостаточна для формирования калмановской оценки  $x(k)$ , то вместо нее можно использовать рекуррентную оценку наименьших квадратов или оптимальную оценку метода максимального правдоподобия. При этом важно, что структура вычислений во всех перечисленных случаях одинакова [3].

Привлекательность применения рассматриваемого класса алгоритмов обуславливается еще и тем, что они остаются эффективными и при наличии неизвестных параметров в матрице  $A(i)$

(разумеется, при учете факта их наличия в алгоритмах).

2. Предположим, что в момент измерений  $Z(i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$  все  $u(i)=0$ . По измерениям  $Z(i)$   $i=1,2,\dots,n$  на всех мониторах естественно попытаться вначале оценить вектор состояния  $X(0)$ , а затем вычислить и оптимальные управления  $u(i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ .

Оценку вектора состояния пучка  $\hat{X}(0)$  можно вычислить так же, как и в предыдущей постановке задачи, с помощью фильтра Калмана, а управление  $u(i)$  вычислять по формуле (4), в которой в качестве  $X(i)$  необходимо использовать последовательность

$$X(i+1) = A(i)X(i) + B(i)u(i), \quad X(0) = \hat{X}(0). \quad (5)$$

Очевидно, что в идеальном случае при известном  $X(0)$  достаточно с помощью четырех корректоров скомпенсировать вектор состояния до нуля на локальном участке тракта.

3. С учетом обозначений

$$\begin{aligned} X &= [X(1), Z(2), \dots, X(n)]^T, & U &= [U(1), U(2), \dots, U(n)]^T, \\ Z &= [Z(1), Z(2), \dots, Z(n)]^T, & H &= [H(1), H(2), \dots, H(n)]^T, \\ & & V &= [V(1), V(2), \dots, V(n)]^T \end{aligned}$$

и равенств (1), (2) легко можно получить следующие зависимости:

$$X = AX(0) + BU \quad (6)$$

$$HX = HAX(0) + HBU, \quad (7)$$

где матрицы  $A$  и  $B$  элементарно вычисляются через  $A(i)$  и  $B(i)$ ,  $i=0,\dots,n$ .

Пусть, как и в предыдущем пункте, в момент измерений  $Z(i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$  все  $u(i)=0$ , а целью управления является поиск такого значения  $u$ , при котором  $\|HX\| \rightarrow 0$ . Если предположить, что  $\|HX\| \ll 1$ , то имеем из (7):

$$HAX(0) = -HBU, \quad Z = HAX(0) + U,$$

$$Z = -HBU + U \quad (8)$$

Рассматривая соотношения (8) как линейную модель наблюдения величин  $U$  по измерениям  $Z$ , оптимальное оценивание  $U$  можно снова, как и в предыдущих случаях, производить калмановскими алгоритмами рекуррентной фильтрации.

На наш взгляд, последний подход формирования оптимальных управлений, несмотря на его эвристичность, должен быть наиболее эффективен в практическом смысле, так как, помимо относительной вычислительной простоты, используемая в нем априорная информация, заключающаяся в матрице  $B$ , легко может быть уточнена экспериментально в процессе простых калибровочных измерений.

#### СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для исследования алгоритмов оценки и управления, описанных выше была написана программа, состоящая из нескольких модулей, каждый из которых может работать отдельно в реальном масштабе времени. В программе использован формализм пакета TRANSPORT. Входными параметрами программы являются: структура тракта, которая может включать в себя отклоняющие магниты, квадруполь, корректоры, синхротронные магниты. Вращения элементов тракта вокруг оси движения задаются матрицами вращения. Корректоры рассматриваются как элементы, в центре которых пучок меняет лишь угловые характеристики  $(x', z')$ . Для моделирования возмущений элементов тракта в программе можно задать изменения углов пучка  $(\Delta x', \Delta z')$  в центре каждого элемента.

Программа состоит из следующих модулей:

- модуля имитации прохождения пучка через тракт транспортировки;
- оценки начальных параметров пучка  $x, x', z, z', \Delta P/P$ ;

- модуля управления.

Эти модули могут работать отдельно, используя файл структуры тракта. Модуль управления состоит из подпрограмм оптимизации, реализующих метод наименьших квадратов в рекуррентном и нерекуррентном виде, а также программы создания локальных коррекций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Эффективность предлагаемого программного обеспечения была исследована с помощью имитационного моделирования процессов оценок и управления на примере тракта транспортировки электронов из "Петры" в "Геру".

Тракт длиной примерно в 219 метров содержит 19 отклоняющих магнитов и 19 квадруполей. Система наблюдения и управления состоит из 20 экранных мониторов и 20 корректоров: 10 горизонтальных и 10 вертикальных. Почти все корректоры и мониторы размещены после каждого квадруполя. Наличие вертикально отклоняющих магнитов и поворотов квадруполей приводит к связи вертикального и горизонтального движения [4].

С помощью модуля имитации прохождения пучка через тракт транспортировки и датчика псевдослучайных чисел имитировался процесс съема информации с мониторов. При этом в качестве шумовой компоненты измерений использовался нормально распределенный шум с нулевым математическим ожиданием и нормальным отклонением в 1мм (точность экранных мониторов равна 0,5мм).

Были проведены исследования качества оценок начальных параметров пучка  $x(0)$ ,  $x'(0)$ ,  $z(0)$ ,  $z'(0)$ , АР/Р и эффективности алгоритмов управления.

## 1. Оценка параметров пучка

Использовалась рекуррентная модификация фильтра максимального правдоподобия. Основные результаты моделирования следующие:

- при выборе начальной ковариационной матрицы ошибок неизвестных параметров  $P(0)$  диагональной со значениями в  $10^5$ - $10^6$  раз больше порядка оцениваемых параметров и начальных оценок параметров, равных 0, процесс сходимости оценок малочувствителен к начальным значениям диагональных элементов  $P(0)$ ;

- после примерно 60 итераций (что соответствует проводке 60 банчей через тракт) оценки находятся в пределах допустимых точностей (0,5мм) и существенно не меняются при использовании дальнейших измерений

Типичная реализация процесса оценивания с начальными параметрами  $x=2$ мм,  $x'=0,1$ рад,  $z=1$ мм,  $z'=0,1$ рад,  $\Delta P/P=0,2\%$  от количества итераций приведена на рис. 1-6.

## 2. Оценка оптимального управления

При оценке оптимального управления имитируемая возмущенная траектория пучка является результатом ненулевых начальных координат пучка и/или возмущений в элементах тракта. Оценка оптимального управления проводилась в основном описанным выше алгоритмом оценивания без предварительной оценки  $P(0)$  в рекуррентной и не рекуррентной формах метода наименьших квадратов (максимального правдоподобия).

Результаты моделирования показали, что траектория пучка под воздействием управления, полученного после порядка 50 итераций, практически совпадает с осью тракта. Типичные результаты

процесса настройки тракта приведены на рис. 7-12. На рис. 7-10 приведены траектории координат пучка при оптимальном управлении, полученные рекуррентным и нерекуррентным методом наименьших квадратов, когда в качестве управляющих органов были использованы все 20 корректоров.

На рис. 11,12 показаны траектории пучка без управления и с оптимальным управлением. Здесь, кроме корректоров, в качестве управляющих параметров использованы токи 2-х септумов "Петры" и 2-х септумов "Геры", а также 11 отклоняющих магнитов, имеющих один источник питания.

#### **ВЫВОДЫ**

Полученные результаты позволяют надеяться, что предлагаемое программное обеспечение может быть эффективно использовано для автоматизированной настройки трактов транспортировки пучков большой протяженности.

Date 2/07/1990

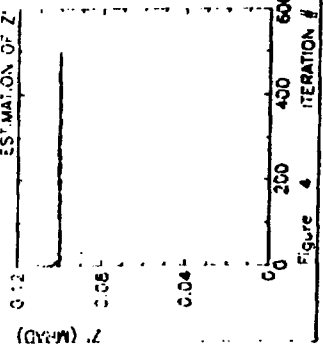
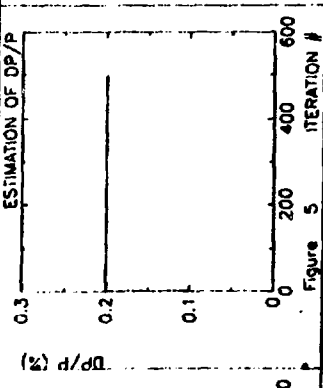
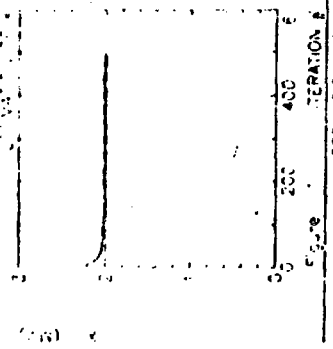
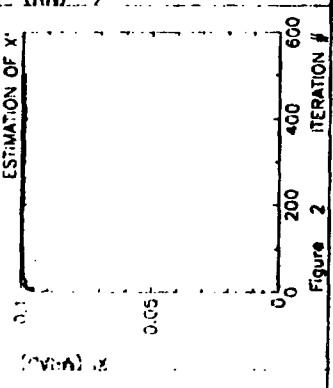
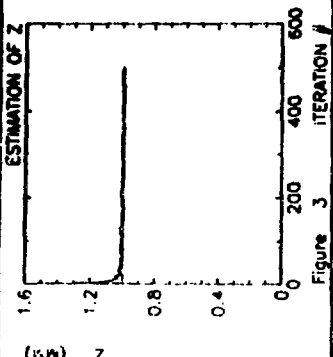
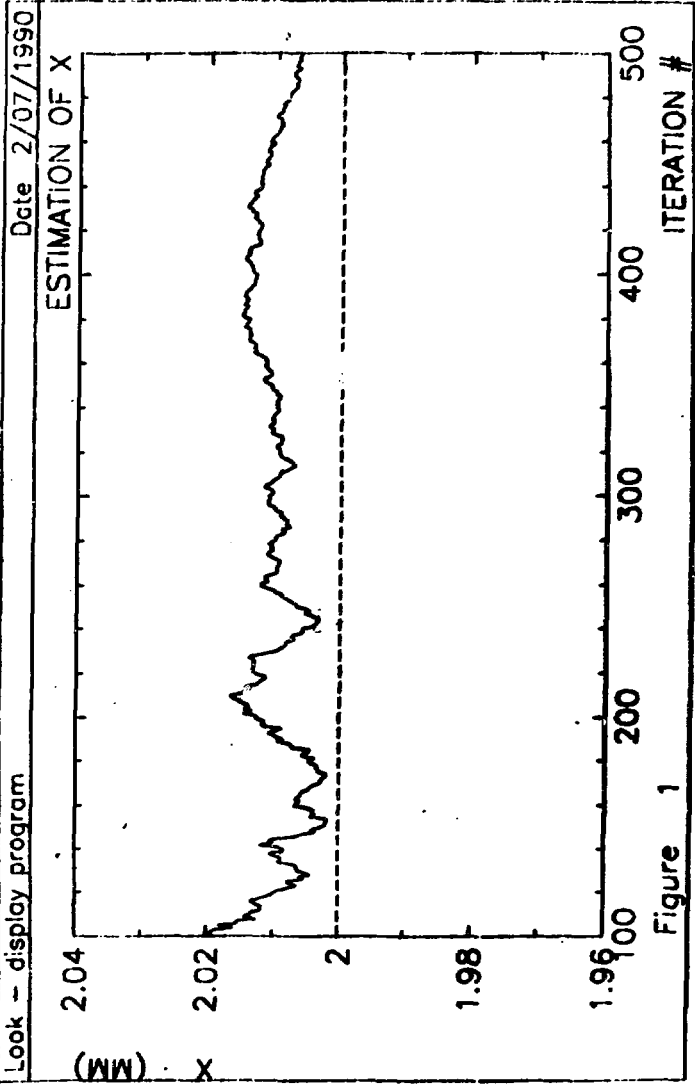


FIG. 1.



PWG.2

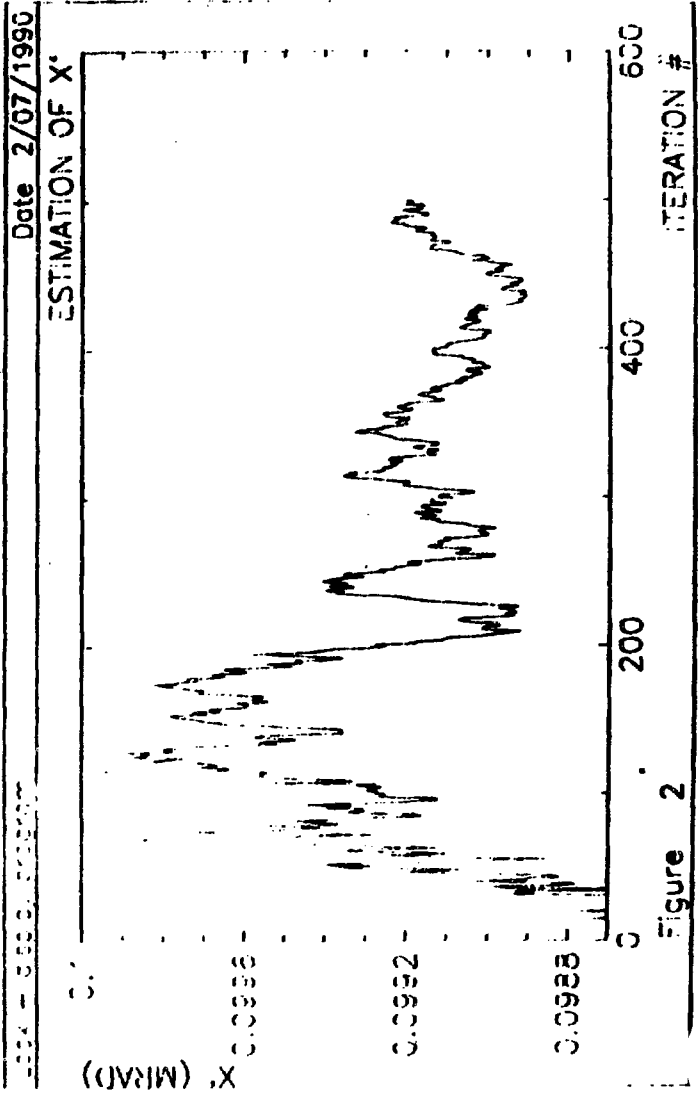


Figure 2

Рис. 3

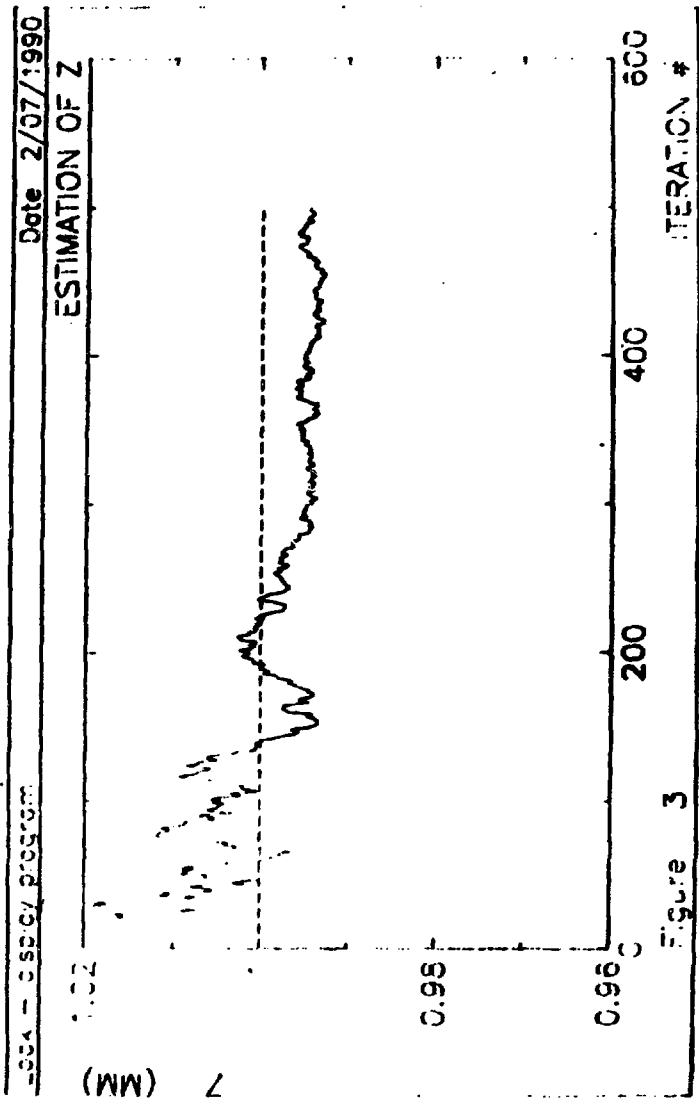


Рис. 4

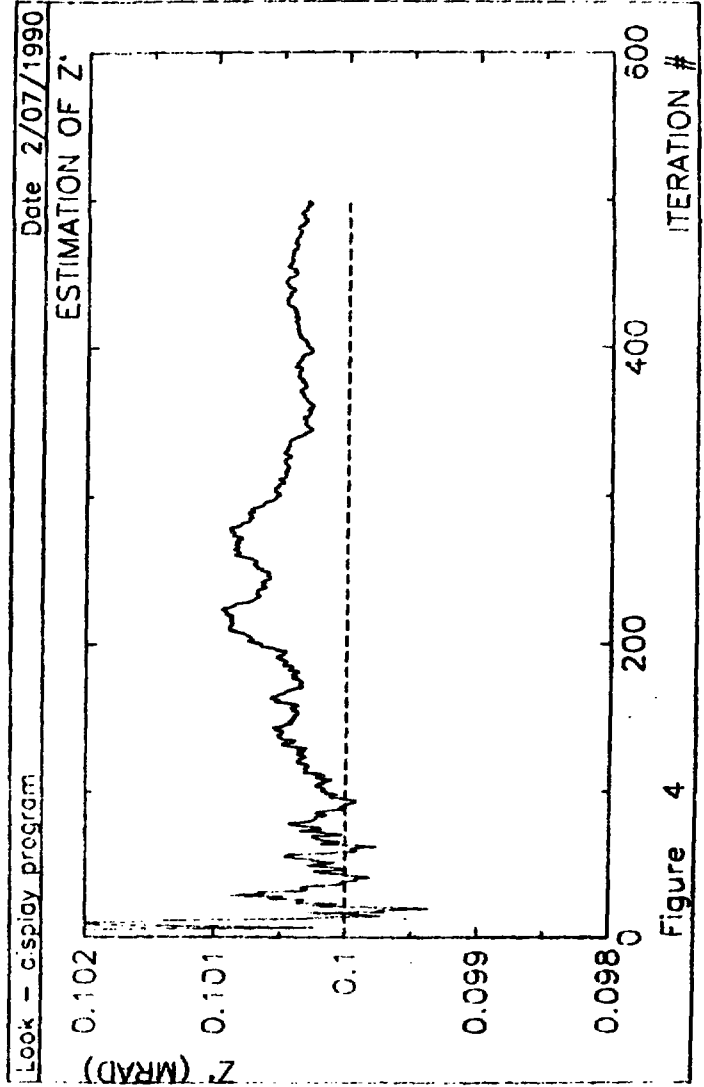


Figure 4

Рис 5

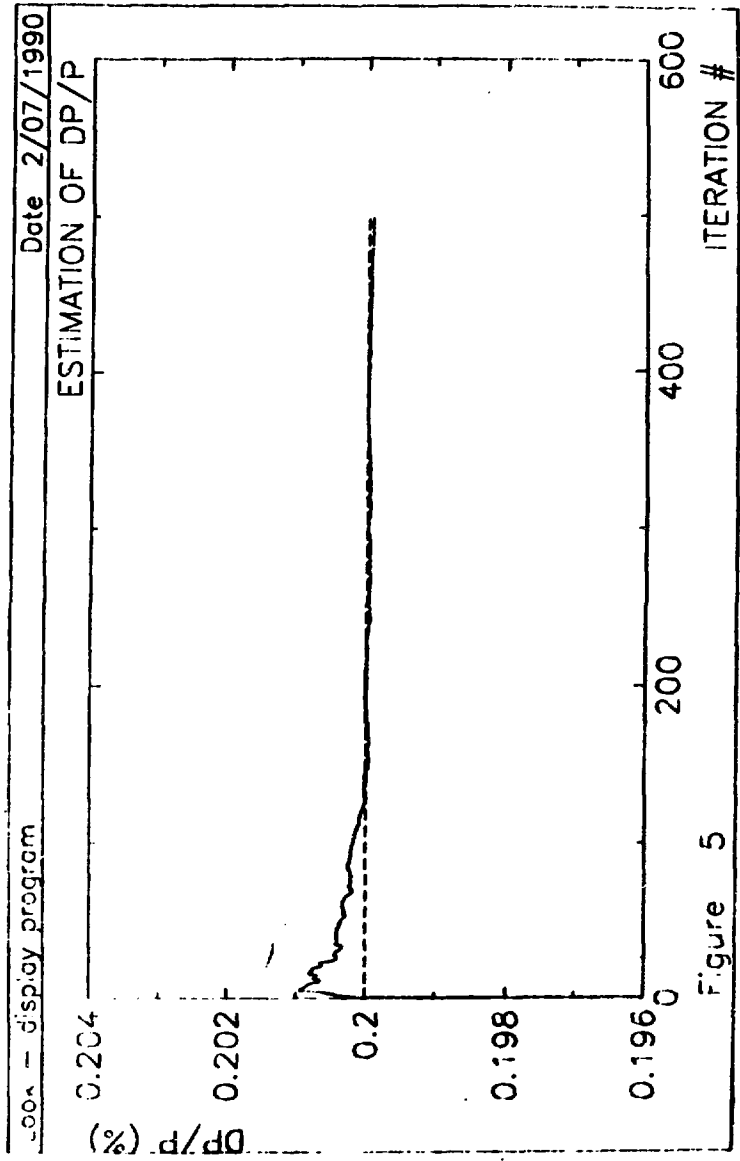


Figure 5

FIG. 5

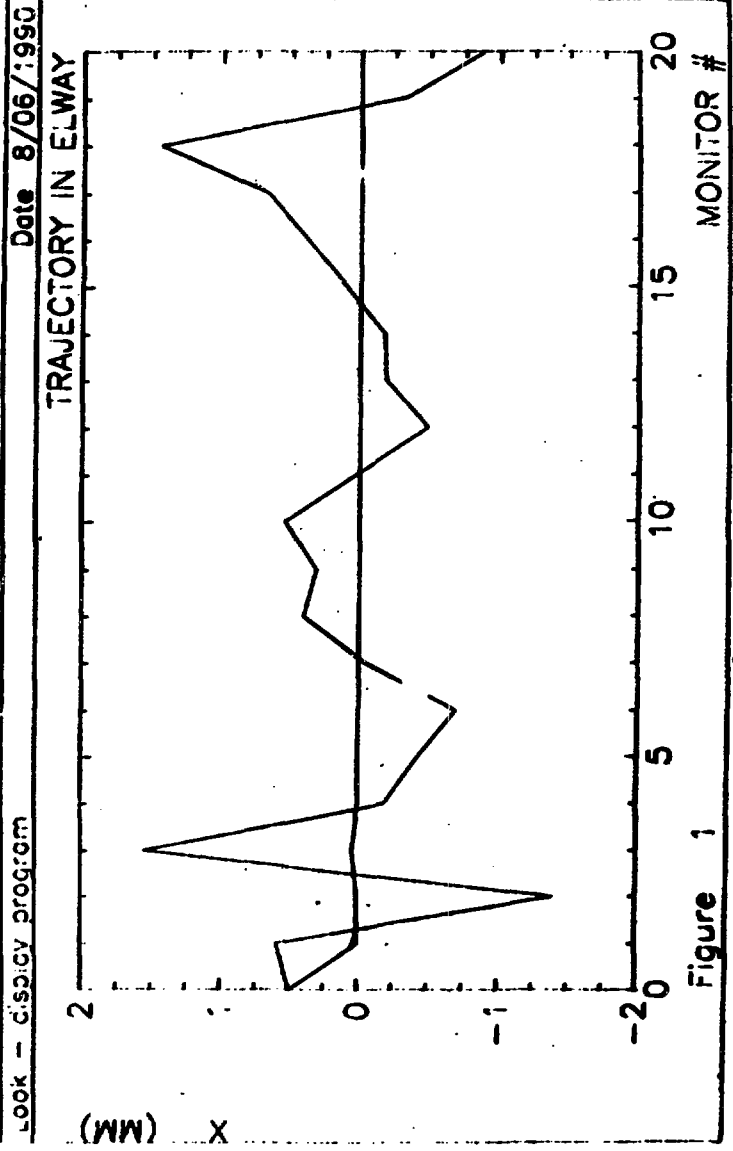


Figure 1

Рис. 7

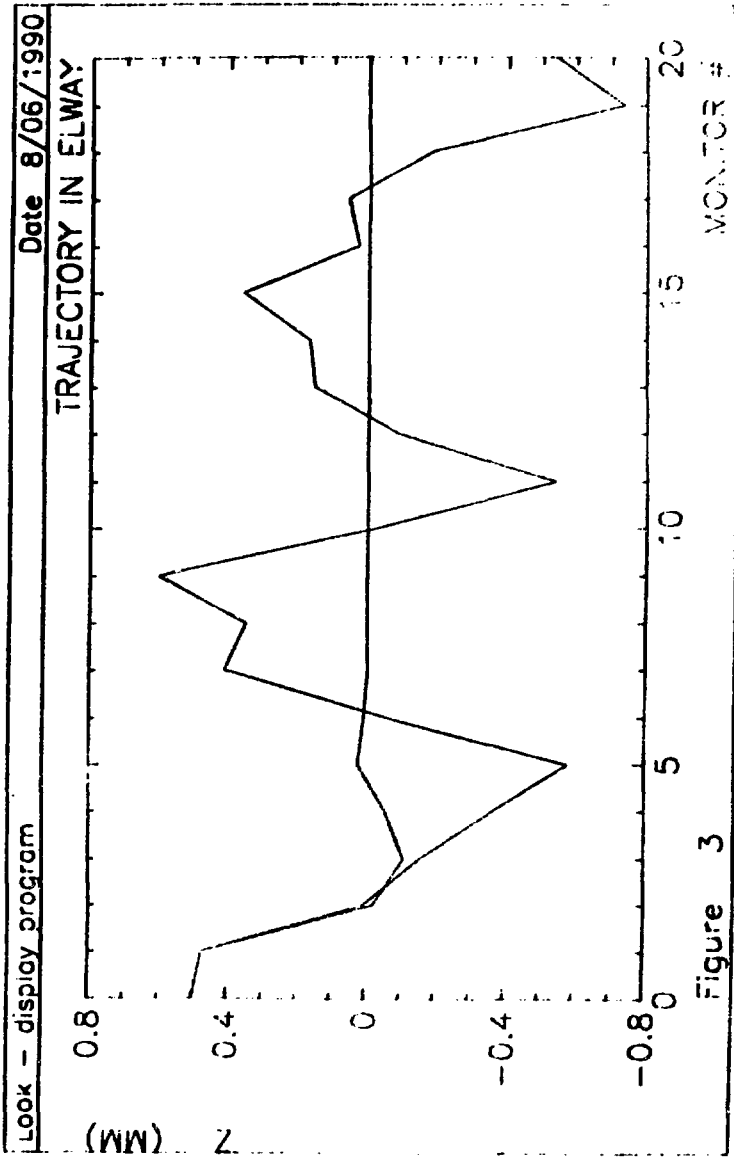


Figure 3

Рис. 8

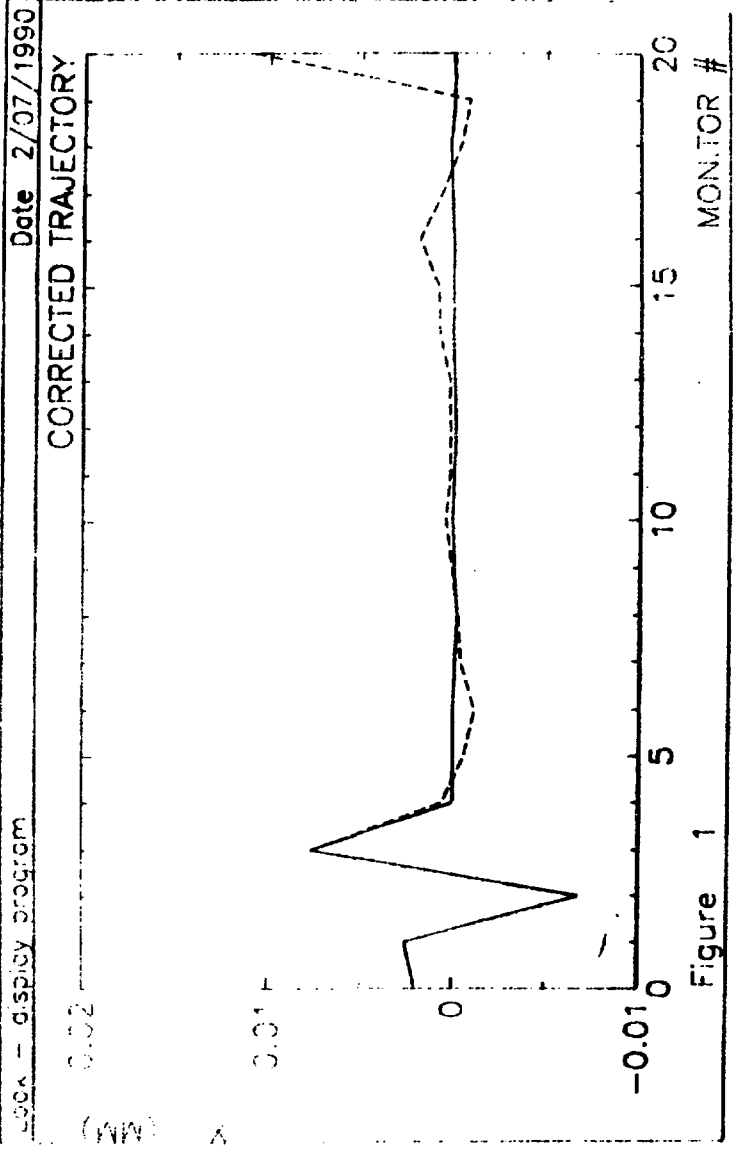
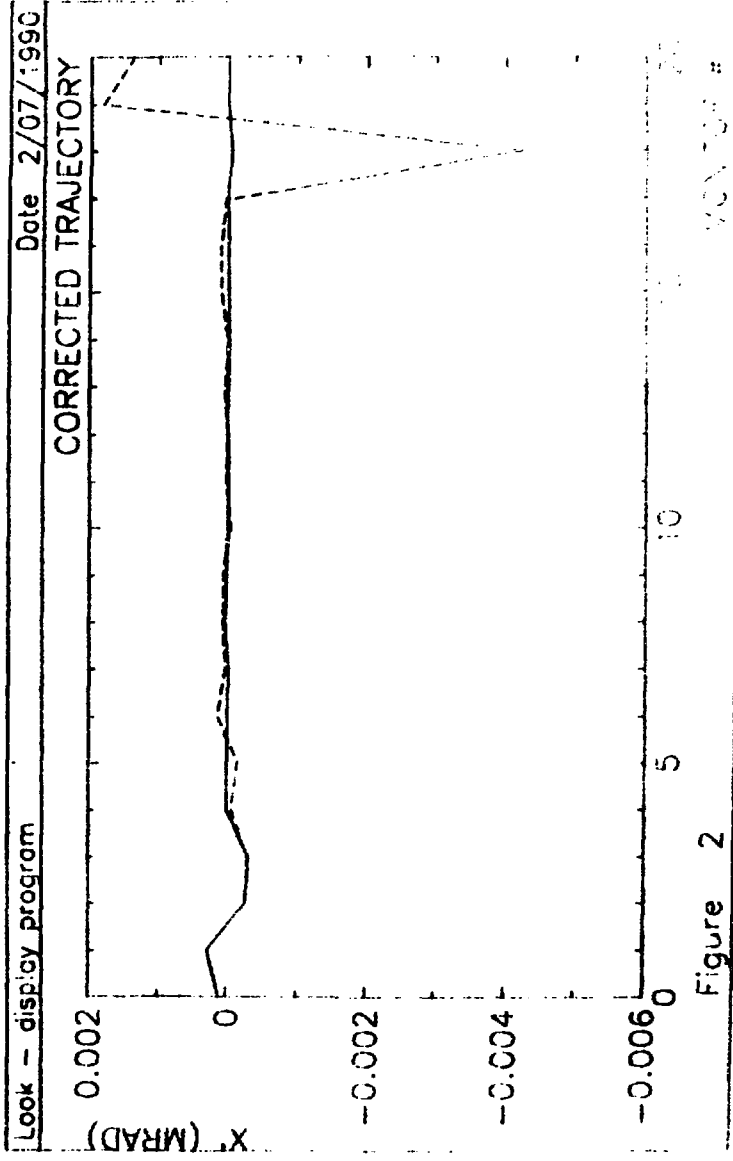


FIG. 9



Page 11

LOCK - 6506y program

Date 2/07/990

CORRECTED TRAJECTORY

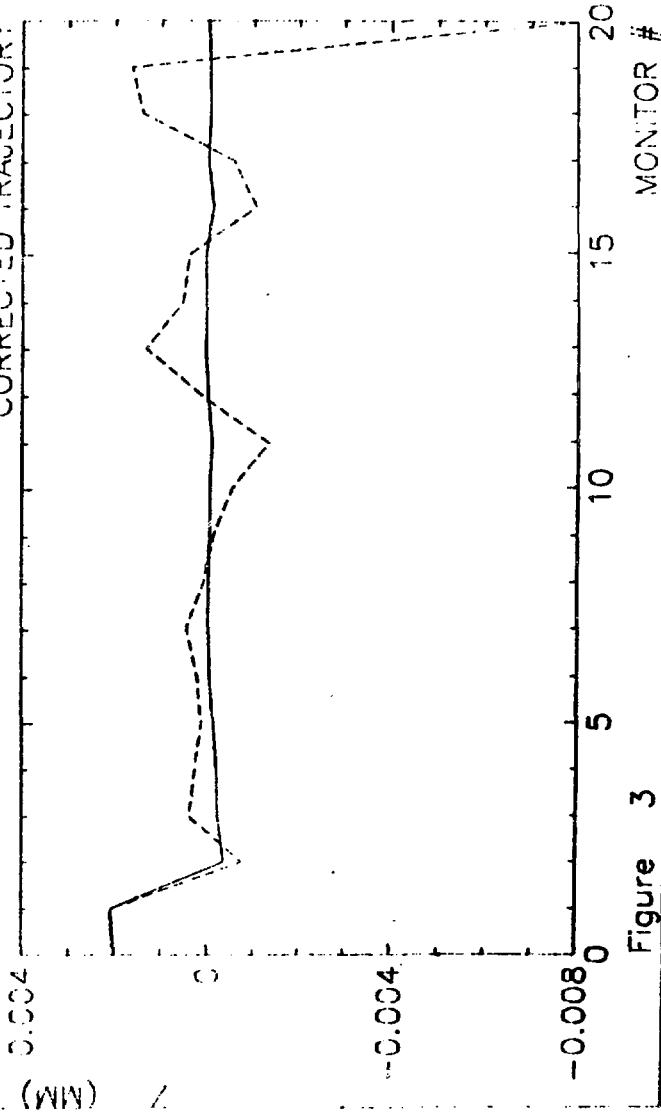


Figure 3

Рис. 11

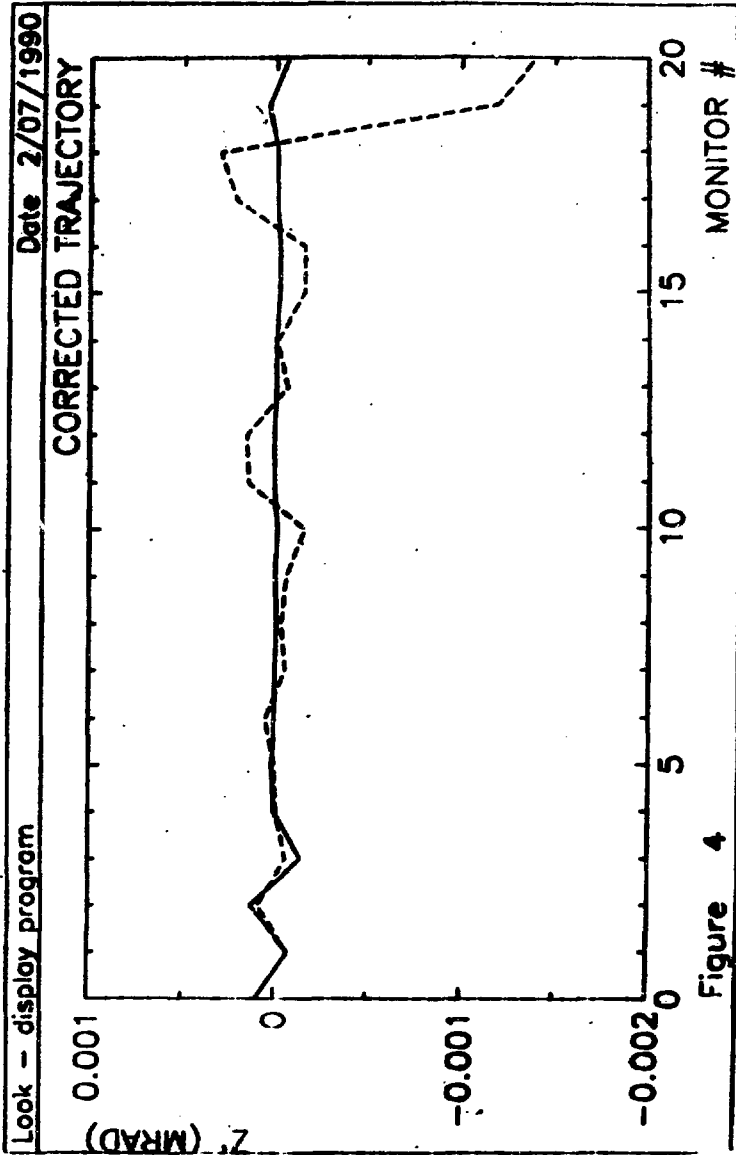


Figure 4

Doc. 12

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jahl L., Ehrich F.// Computing in accelerator design and operation, Berlin (Germany), 1983.  
Pines H., Selph F.// LBL-11580, IEEE Transactions on Nuclear Sciences NS-28, 1983.  
Lee M., Clearwater S., Theil E., Paxson V.// SLAC-DJVB-4213, February, 1987.
2. Brown K.L., Rothacher F., Carey D.S., Iselin Ch.// TRANSPORT, SLAC-91, 1977.
3. Sage A.P., White Ch. C.// Optimum System Control, 1977 by Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 07632.
4. Якобс Дж.// ДЕЗИ, частное сообщение, 1989.

Рукопись поступила 20 сентября 1990 г.

**The address for requests:  
Information Department  
Yerevan Physics Institute  
Alikhanian Brothers 2,  
Yerevan, 375036  
Armenia, USSR**

**С. Г. АНАНЯН, Р. О. МАНУКЯН**

**О ПОСТРОЕНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
НАСТРОЙКИ ТРАКТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ**

Редактор Л. П. Мукаян

Технический редактор А. С. Абрамян

---

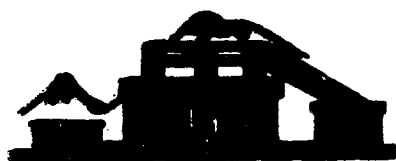
Подписано в печать 25/ХП-90г.  
Офсетная печать. Уч. изд. л. 1,0  
Зак. тип. 354

Формат 60×84×16  
Тираж 299 экз. Ц. 15.  
Индекс 3649

---

Отпечатано в Ереванском физическом институте  
Ереван-36, ул. Братьев Алиханян 2.

**ИНДЕКС 3649**



**ВРЕМЯНОСНАЯ ГЕРМАНСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**