

**И Н С Т И Т У Т  
Я Д Е Р Н О Й Ф И З И К И С О А Н С С С Р**

**ПРЕПРИНТ И Я Ф 114 -73**

**В.А.Гудков, М.М.Карлинер, А.С.Медведко,  
Б.М.Фомель**

**АНАЛОГОВАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСНОЙ  
ОРБИТЫ В НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП - 3**

**Новосибирск  
1973**

Б.А.Гудков, М.М.Карлинер, А.С.Медведко,  
Б.М.Фомель

## АНАЛОГОВАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСНОЙ ОРБИТЫ В НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-3

### А Н Н О Т А Ц И Я

Разработано специализированное аналоговое устройство, позволяющее моделировать движение частиц в жесткофокусирующей магнитной системе накопителя ВЭПП-3. Анализируется точность моделирования. Приводятся результаты измерения коэффициентов матриц, описывающих работу системы коррекции равновесной орбиты для двух способов коррекции - точечного и гармонического, а также результаты совместной работы аналоговой модели и ЦВМ.

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \Gamma_x(s) \frac{dx}{ds} + K_x(s)x = F_x(s) + F_x(s)_{\text{корр}} \quad (1.1)$$

$$\frac{d^2z}{ds^2} + \Gamma_z(s) \frac{dz}{ds} - K_z(s)z = F_z(s) + F_z(s)_{\text{корр}} \quad (1.2)$$

где  $x, z$  - отклонения траектории по радиусу и вертикали от идеальной равновесной орбиты, определяемой элементарными движениями в энергетической плоскости.

$s$  - текущая длина пути, отсчитываемая вдоль идеальной орбиты;  
 $\Gamma_x(s), \Gamma_z(s), K_x(s), K_z(s)$  - переменные коэффициенты, которые в общем случае являются функциями  $s$  с периодом  $\Pi$  ( $\Pi$  - период орбиты).

## 1. Постановка задачи

На накопителе ВЭПП-3 предусмотрена возможность автоматической коррекции равновесной орбиты. В настоящее время работает система коррекции равновесной орбиты /1/ и завершается создание системы контроля положения равновесной орбиты /2/. Автоматическая коррекция будет осуществляться с помощью ЭВМ. Снабженная устройствами связи с системой коррекции и системой наблюдения, ЭВМ явится звеном, через которое будет замкнута обратная связь. Система наблюдения выполняется таким образом, что азимутальные отклонения равновесной орбиты по радиусу и вертикали преобразуются в периодические напряжения с периодом 20 мс, а система коррекции осуществляет преобразование периодических напряжений в азимутально распределенные вертикальные и радиальные корректирующие магнитные поля.

Для успешной работы системы с обратной связью необходимо знать свойства разомкнутой системы автоматической коррекции. Изучение реакций разомкнутой системы на те или иные виды воздействий и явилось основной задачей моделирования.

Запишем уравнения поперечных колебаний частиц в накопителе в линейном приближении и предположении независимости вертикальных и радиальных колебаний /3/, /4/

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \Gamma_x(s) \frac{dx}{ds} + K_x(s)x = F_x(s) + F_x(s)_{\text{корр}} \quad (1.1)$$

$$\frac{d^2z}{ds^2} + \Gamma_z(s) \frac{dz}{ds} + K_z(s)z = F_z(s) + F_z(s)_{\text{корр}} \quad (1.2)$$

где  $x$ ,  $z$  - отклонения траектории по радиусу и вертикали от идеальной равновесной орбиты, определяемой идеальным поворачивающим полем и энергией частицы.

$s$  - текущая координата, отсчитываемая вдоль идеальной орбиты;  
 $\Gamma_x(s)$ ,  $\Gamma_z(s)$ ,  $K_x(s)$ ,  $K_z(s)$  - переменные коэффициенты, которые в общем случае периодичны по  $s$  с периодом  $\Pi$  ( $\Pi$  - периметр орбиты);

$F_x(s)$ ,  $F_z(s)$  - внешние возмущения, в которых условно сосредоточены неидеальности магнитной системы;

$F_x(s)_{\text{корр}}$ ,  $F_z(s)_{\text{корр}}$  - корректирующие воздействия.

Правые части уравнений также периодичны по  $S$  с периодом  $\Pi$ . Накопитель ВЭПП-3 имеет жесткофокусирующую магнитную систему структуры FODO, поэтому коэффициенты  $K_x(s)$ ,  $K_z(s)$  хорошо аппроксимируются кусочно-постоянными функциями /3/.

Будем интересоваться только вынужденными составляющими решения уравнений (1.1) и (1.2), которые описывают равновесную орбиту.

Уравнения (1.1) и (1.2) отличаются лишь конкретным видом коэффициентов и внешних сил, что позволяет без потери общности ограничиться рассмотрением одного из них, например, (1.2).

Система коррекции равновесной орбиты позволяет осуществить два способа коррекции: гармонический и точечный. Первый из них предполагает выделение отдельных азимутальных гармоник в возмущении  $F_z(s)_{\text{корр}}$  с целью подавления соответствующих гармоник в отклонении  $Z(s)$ .

Между гармониками воздействия и отклонения существуют еще и перекрестные связи, что может быть записано как

$$\begin{cases} u_k^c = \sum_{n=1}^N (m_{kn}^{cc} v_n^c + m_{kn}^{cs} v_n^s) \\ u_k^s = \sum_{n=1}^N (m_{kn}^{sc} v_n^c + m_{kn}^{ss} v_n^s) \end{cases} \quad (1.3)$$

где  $v_n^c$ ,  $v_n^s$  - косинусная и синусная составляющие  $n$ -й гармоники, поданной на вход исполнительной части системы коррекции;

$u_k^c$ ,  $u_k^s$  - косинусная и синусная составляющие  $k$ -й гармоники на выходе системы наблюдения.

$k=1, \dots, K$ ;  $K$  - число рассматриваемых гармоник отклонения,  
 $n=1, \dots, N$ ;  $N$  - число рассматриваемых гармоник воздействия.

Коэффициенты  $m_{kn}^{cc}$ ,  $m_{kn}^{cs}$ ,  $m_{kn}^{sc}$ ,  $m_{kn}^{ss}$  образуют матрицу  $M$ , которую будем для краткости называть гармонической. Выражения (1.3) в векторной форме запишутся как

$$U = MV \quad (1.4)$$

Гармоническую матрицу можно разбить на  $K \cdot N$  блоков вида

$$m_{kn} = \begin{pmatrix} m_{kn}^{cc} & m_{kn}^{cs} \\ m_{kn}^{sc} & m_{kn}^{ss} \end{pmatrix}; \quad M = (m_{kn}) \quad (1.5)$$

или же на четыре блока

$$m^{cc} = \begin{pmatrix} m_{11}^{cc} & \dots & m_{1N}^{cc} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{K1}^{cc} & \dots & m_{KN}^{cc} \end{pmatrix}; \quad m^{cs} = (m_{kn}^{cs}); \\ m^{sc} = (m_{kn}^{sc}); \quad m^{ss} = (m_{kn}^{ss}); \quad M = \begin{pmatrix} m^{cc} & m^{cs} \\ m^{sc} & m^{ss} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Точечный метод коррекции предполагает задание корректирующих воздействий в отдельные корректоры независимо. При этом отклонения орбиты в точках наблюдения  $Z_i = Z(s_i)$  оказываются связанными с корректирующими воздействиями  $f_j$ , введенными в  $j$ -е корректоры, посредством матрицы, которую назовем точечной

$$Z_i = \sum_{j=1}^J \tilde{t}_{ij} f_j; \quad T = (\tilde{t}_{ij}) \quad (1.7)$$

Размерность матрицы  $I \cdot J$ , где

$I$  - количество точек наблюдения,  
 $J$  - количество корректоров

$$i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J$$

Теперь задачу моделирования можно сформулировать более конкретно: измерение матричных элементов гармонической и точечной матриц.

Необходимо отметить, что матрицы  $M$  и  $T$  описывают лишь статику системы, хотя на модели в принципе можно изучать и динамику, а также статику и динамику замкнутой системы, что не входило в задачу на первом этапе.

## 2. Структура аналоговой модели

Моделирование было проведено в натуральном масштабе времени системы коррекции. Частота обращения частицы ( $f_{обр}$ ) в модели равна частоте опроса датчиков (50 гц). Это наложило довольно высокие требования на частотные характеристики операционных усилителей. Кроме того, для формирования кусочно-постоянной функции  $K_z(s)$  потребовалось специальное времязадающее устройство. Отсутствие подобных устройств в промышленных аналоговых вычислительных машинах (АВМ), а также недостаточная для данной задачи широкополосность применяемых в них операционных усилителей, исключили возможность использования промышленной АВМ.

Аналоговая модель состоит из следующих частей (рис.2.1): аналоговый вычислитель 1, времязадающее устройство 2, устройства, моделирующие корректоры 3 и систему наблюдения 4.

а) Аналоговый вычислитель. Набор задачи осуществлен методом понижения порядка производной. Блок-схема вычислителя показана на рис.2.2, где 1,2,3,4 - операционные усилители,  $K_1-K_2$  - электронные ключи,  $E_1, E_2$  - регулируемые источники напряжений начальных условий. Схема на рис.2.2 реализует следующее машинное уравнение:

$$\ddot{u} + \Gamma \dot{u} + \frac{K(\tau)}{T_1 T_2} u = F(\tau) + F(\tau)_{корр} \quad (2.1)$$

где  $T_1 = R_1 C_1$  - постоянная времени первого интегратора,  
 $T_2 = R_2 C_2$  - постоянная времени второго интегратора,  
 $\Gamma = \frac{1}{T_1} \frac{R_{12}}{R_{11}} \frac{R_{15}}{R_{13}}$  - коэффициент при первой производной, определяющий затухание свободных колебаний,  
 $K(\tau)$  - передаточный коэффициент сложного маш

табного звена, выполненного на усилителях 3 и 4 и ключах  $K_7-K_{12}$

В режиме установки начальных условий ключи  $K_1, K_2$  разомкнуты, а  $K_3-K_6$  - замкнуты и усилители 1 и 2 оказываются включенными по схеме аperiodических звеньев, на входы которых подаются соответственно напряжения  $E_1$  и  $E_2$ . Постоянные времени звеньев одинаковы и равны  $3 \cdot 10^{-4}$  сек.

При переходе в режим решения размыкаются ключи  $K_3-K_6$  и замыкаются  $K_1, K_2$  (см. таблицу 2.1).

Условимся называть фокусирующими и дефокусирующими те участки, где осуществляется соответственно фокусировка и дефокусировка и моделируемой ( $Z$ ) координате и выпишем значения функции  $K(\tau)$ , а также состояния ключей  $K_7-K_{12}$  для различных участков.

Таблица 2.1

Участок решения	$ K(\tau) $	Состояния ключей					
		$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$	$K_{12}$
0	0	0	0	1	0	0	1
ФПК	$\frac{R_{15}}{R_7 + R_8 + R_{14}}$	1	0	0	0	0	1
ДПК	$\frac{R_{12}}{R_7 + R_9 + R_{10}} \cdot \frac{R_{15}}{R_{13}}$	0	0	1	1	0	0
ФПП	$\frac{R_{15}}{R_7 + R_{14}}$	0	1	0	0	0	1
ДПП	$\frac{R_{12}}{R_7 + R_{10}} \cdot \frac{R_{15}}{R_{13}}$	0	0	1	0	1	0

Здесь 0 - участок с нулевым градиентом поля.

ФПК, ДПК - фокусирующий и дефокусирующий участки полукольца,  
 ФПП, ДПП - фокусирующий и дефокусирующий участки прямолинейного промежутка.

1 - ключ замкнут.

0 - ключ разомкнут.

Управление группой ключей  $K_1 - K_6$  может производиться либо от времязадающего устройства, либо вручную. Управление группой ключей  $K_7 - K_{12}$  производится от времязадающего устройства.

В вычислителе используются усилители типа 1УТ401Б, интегральные прерыватели типа ИП-1А и интегральные логические элементы 217 серии.

#### б) Времязадающее устройство (ВЗУ).

ВЗУ представляет собой комбинацию прецизионных аналоговых схем задержки и цифровых схем.

При выборе блок-схемы ВЗУ была использована следующая закономерность, существующая в геометрии накопителя ВЭПП-3: длина элемента периодичности равна  $315 \text{ см} = 21 \times 3 \times 5 \text{ см}$ , длина прямолинейного промежутка  $1200 \text{ см} = 24 \times 10 \times 5 \text{ см}$ . Кроме того, при соответствующем выборе начала отсчета прямолинейного промежутка, дублиеты квадрупольных линз находятся от него на расстоянии, кратном  $50 \text{ см}$ . Таким образом, использование элементарной длины  $5 \text{ см}$  оказывается удобным при воспроизведении всей геометрии ВЭПП-3. Порядок расстановки временных интервалов соответствует направлению движения электронов в кольце.

Блок-схема ВЗУ показана на рис.2.3, где

- 1 - задающий генератор,
- 2 - управляемый счетчик-делитель,
- 3 - главный управляемый счетчик с дешифраторами,
- 4 - управляющий счетчик (счетчик числа элементов периодичности),
- 5,6,7,8 - элементы задержки,
- 9 - схема формирования дублета.

Задающий генератор имеет "период"  $5 \text{ см}$ . Управляемый счетчик формирует интервалы времени, соответствующие длинам  $3 \cdot 5 \text{ см} = 15 \text{ см}$ , либо  $10 \cdot 5 \text{ см} = 50 \text{ см}$ , а главный счетчик -  $21 \cdot 15 \text{ см} = 315$ , либо  $24 \cdot 50 = 1200 \text{ см}$ . Главный счетчик имеет 6 дешифраторов. На дешифраторах, выходы которых подключены к элементу 9, набираются необходимые числа-расстояния от начала прямолинейного промежутка. Элемент 9 формирует дублет при появлении импульса на одном из его входов. На дешифраторе, выход которого подключен к элементу задержки 5, набирается число, соответствующее ближайшему меньшему расстоянию (в единицах по  $15 \text{ см}$ ) до начала фокусирующей линзы элемента периодичности полукольца. Элемент задержки 5 выдает

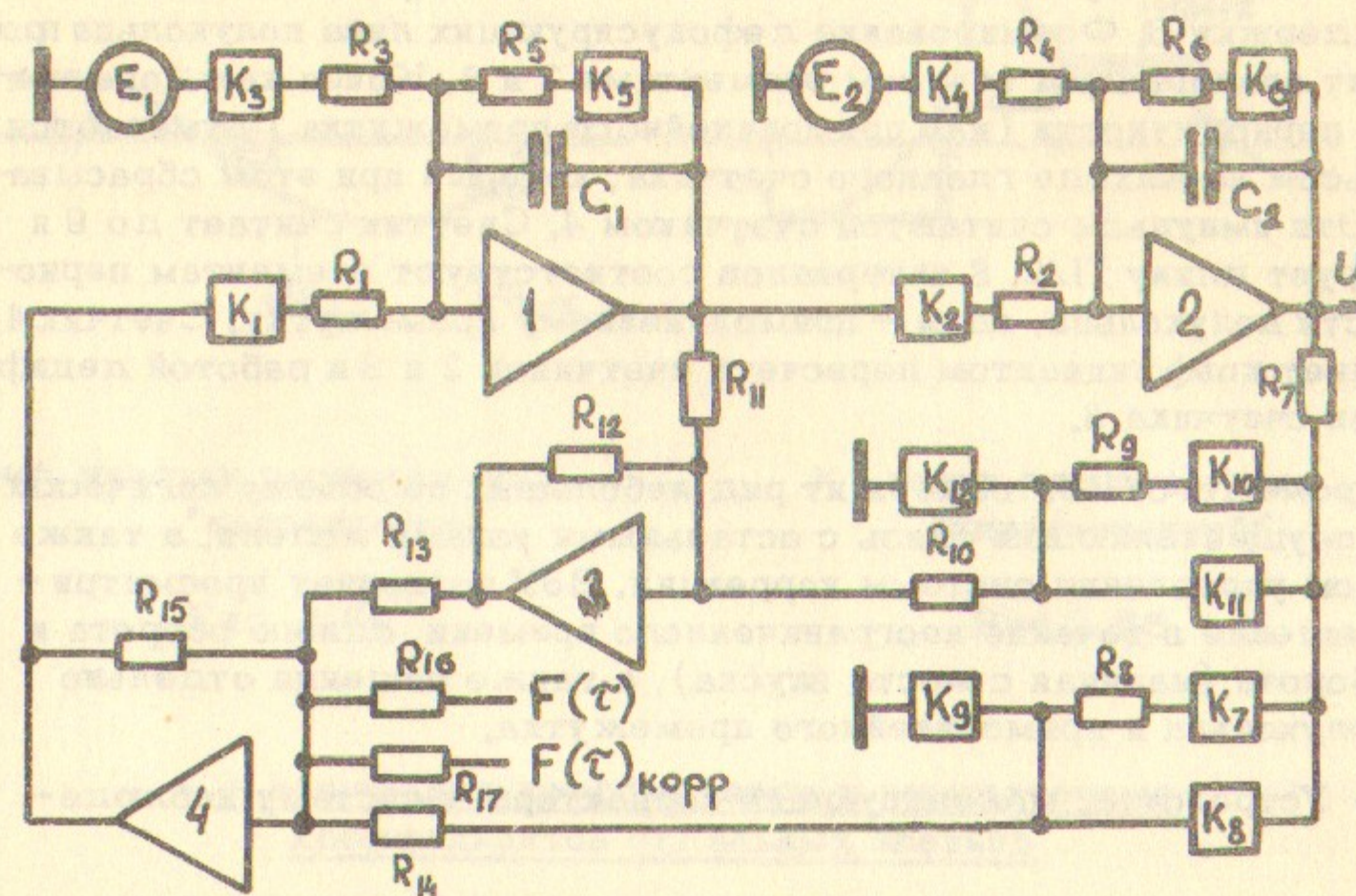


Рис. 2.2

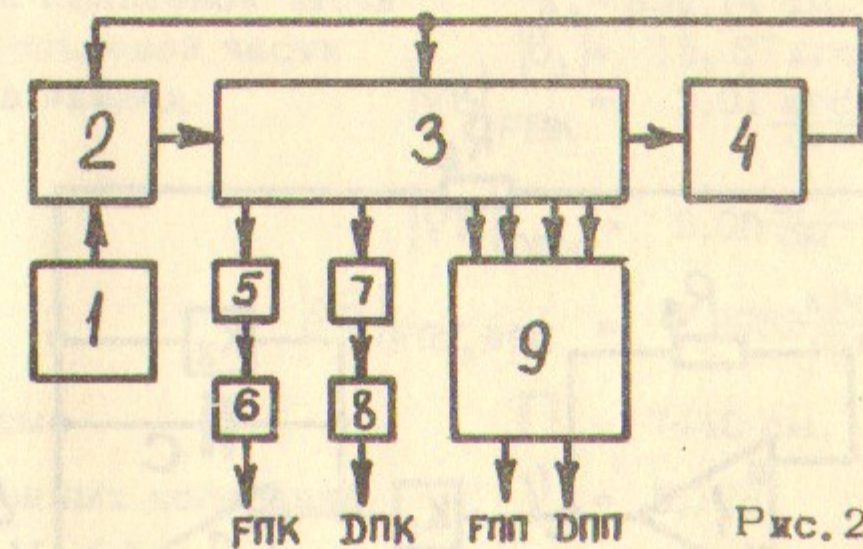


Рис. 2.3

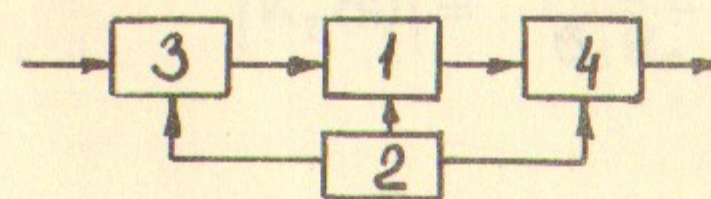


Рис. 2.1

точную координату начала линзы. Длина линзы определяется элементом задержки 6. Формирование дефокусирующих линз полукольца происходит аналогичным образом элементами 7 и 8. Конец каждого элемента периодичности (или прямолинейного промежутка) отмечается импульсом на выходе главного счетчика, который при этом сбрасывается. Эти импульсы считаются счетчиком 4. Счетчик считает до 9 и формирует длину  $\Pi/2$ . 8 интервалов соответствуют элементам периодичности полукольца, один - прямолинейному промежутку. Счетчик 4 управляет коэффициентом пересчета счетчиков 2 и 3 и работой дешираторов счетчика 3.

Кроме того, ВЗУ содержит ряд небольших по объему логических схем, осуществляющих связь с остальными узлами модели, а также с блоком управления системы коррекции. ВЗУ позволяет просматривать решение в течение неограниченного времени, одного оборота и полуоборота (начиная с места впуска), а также решения отдельно для полукольца и прямолинейного промежутка.

в) Устройства, моделирующие корректоры и систему наблюдения.

Данные устройства в схемном решении представляют собой запоминатели (рис.2.4). На рис.2.5а, б показаны эпюры напряжений, поясняющие их работу.

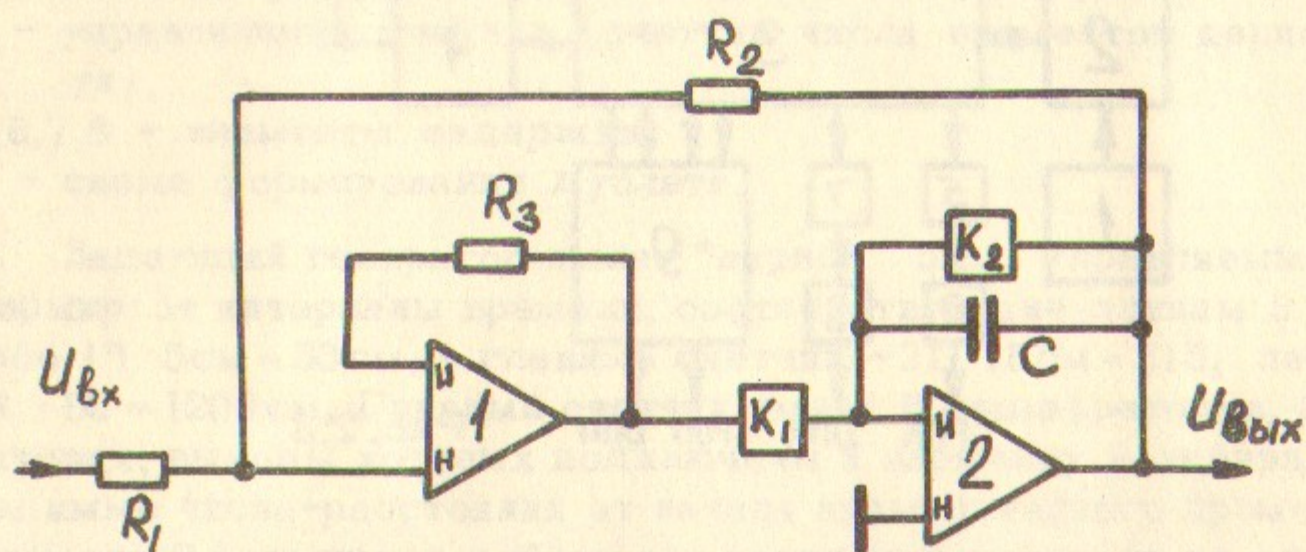
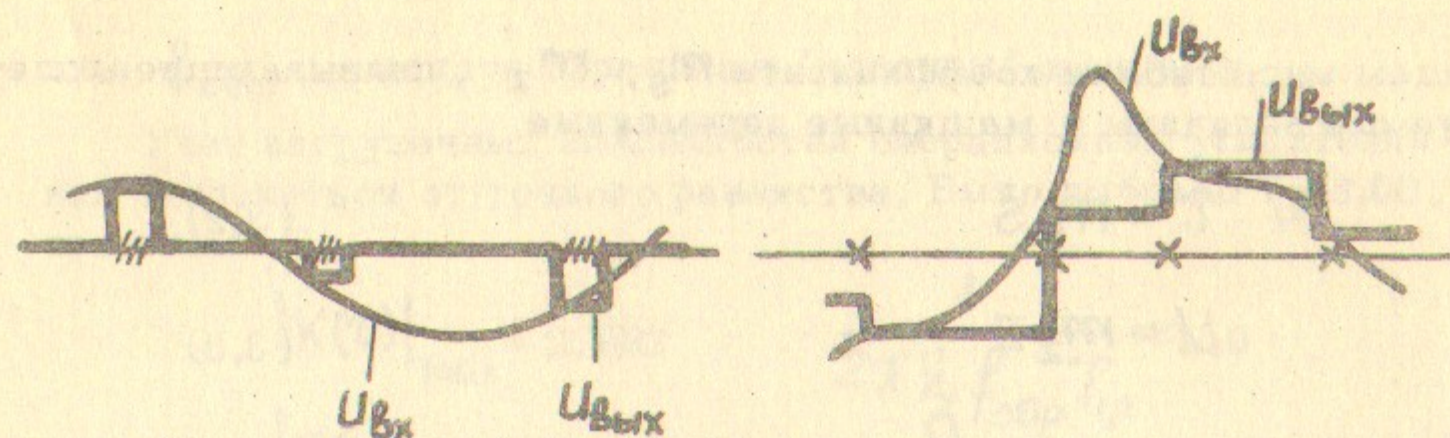


Рис. 2.4



/// участки расположения "корректоров"

Рис. 2.5а

X точки расположения "пикан-станций"

Рис. 2.5б

### 3. Масштабные коэффициенты и передаточные коэффициенты отдельных звеньев

Выпишем некоторые параметры накопительного кольца ВЭПП-3 /3/.

Средний радиус кольцевой части  $R_0 = 802,14$  см.  
 Среднее поле кольцевой части  $|B_0| = 15,37$  кгс.  
 Градиент поля в линзах  $|\nabla B|_{\text{ФПК}} = 2,01 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$   
 $|\nabla B|_{\text{ДПК}} = 2,08 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$   
 $|\nabla B|_{\text{ФПД, ДПД}} = 2,9952 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$

Периметр орбиты  $\Pi = 7440$  см.

Частота бетатронных колебаний  $\gamma_z = 5,193$

Значения  $K_z(s)$  как для линз ПК, так и для линз ПП, определяются формулой

$$|K_z(s)| = \frac{|\nabla B|}{B_0 R_0} \quad (3.1)$$

Введем масштабные коэффициенты  $m_s$ ,  $m_z$ , связывающие моделируемые величины и машинные переменные

$$\tau = m_s s \quad (3.2)$$

$$U = m_z Z \quad (3.3)$$

$\tau$  - машинное время,  $U$  - напряжение на выходе второго интегратора, соответствующее отклонению  $Z$ .

Подставляя (3.2) и (3.3) в (1.2) (полагая в последнем  $F_z(s) = 0$ ,  $F_z(s)_{\text{корр}} = 0$ ,  $\Gamma_z(s) = 0$  и сравнивая полученное уравнение с (2.2) имеем

$$\frac{K(\tau)}{T_1 T_2} = \frac{K_z(s)}{m_s^2} \quad (3.4)$$

Длине  $\Pi$  при моделировании соответствует время  $T_0 = 20 \text{ ms}$ , тогда

$$m_s = \frac{T_0}{\Pi} = 2,688 \cdot 10^{-6} \frac{\text{сек}}{\text{см}}$$

Подставляя теперь в (3.1) необходимые числа с помощью (3.4) находим

$$\left| \frac{K(\tau)}{T_1 T_2} \right|_{\text{ФПК}} = 2,231 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{сек}^2}$$

$$\left| \frac{K(\tau)}{T_1 T_2} \right|_{\text{ДПК}} = 2,308 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{сек}^2}$$

$$\left| \frac{K(\tau)}{T_1 T_2} \right|_{\text{ФПП, ДПП}} = 3,324 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{сек}}$$

т.е.  $|K(\tau)|_{\text{max}} = 3,324 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{сек}} T_1 \cdot T_2$

Выбор значений передаточных коэффициентов получается удачным, если потребовать равенства модулей передаточных функций интеграторов и  $|K(\tau)|_{\text{max}}$  на "резонансной" частоте

$$f_{\text{рез}} = \nu_z f_{\text{обр}} = 5,193 \cdot 50 \text{ гц}$$

где  $f_{\text{обр}}$  - частота обращения "частицы" в модели.

Учет нагрузочных способностей операционных усилителей заставил отклониться от точного равенства. Было выбрано  $T_{1,2} = 3,00 \cdot 10^{-4}$ , при этом

$$|K(\tau)|_{\text{max}} = 2,992$$

$$|K(\tau)|_{\text{ФПК}} = 2,002$$

$$|K(\tau)|_{\text{ДПК}} = 2,077$$

$$|K(\tau)|_{\text{ФПП, ДПП}} = 2,992$$

$$\frac{1}{2\pi \nu_z f_{\text{обр}} T_{1,2}} \approx 2,0$$

#### 4. Погрешности моделирования

Перечислим источники погрешностей:

1. Ошибки установки и нестабильность передаточных коэффициентов и временных интервалов.

2. Неидеальности элементов модели:

а) ограниченная полоса пропускания и конечные значения коэффициентов усиления операционных усилителей;

б) дрейфы операционных усилителей и остаточных напряжений ключей.

3. Вводимое затухание свободных колебаний. Названные причины приводят к следующим эффектам:

а) Повышение порядка уравнения, что в первом приближении дает смещение частоты бегатронных колебаний и изменение добротности.

б) Появление частных решений.

При оценке погрешностей моделирования по  $\nu_z$  предполагалось, что погрешности моделирования для модели без прямолинейных промежутков и полной модели одинаковы и расчеты делались для первого случая.

Оценка сдвига  $\nu_z$  в зависимости от отклонений значений передаточных коэффициентов от расчетных производилась следующим об-



разом: составлялась матрица перехода элемента периодичности в мешинных переменных и находилось выражение для полного дифференциала  $\cos M$  ( $M = 2\pi V/N$  — набег фазы свободных бетатронных колебаний на элементе периодичности), как функции величины передаточных коэффициентов и временных интервалов. Расчет показал, что при точности последних не хуже, чем  $10^{-3}$  максимальная погрешность  $|\Delta V/V| \leq 6,0 \cdot 10^{-3}$ , а среднеквадратичная погрешность не превосходит  $2,7 \cdot 10^{-3}$ .

ТКС и ТКЕ примененных в модели масштабы сопротивлений и конденсаторов позволяют получить нестабильность передаточных коэффициентов  $10^{-3}$  в интервале температур  $10^\circ\text{C}$ . Учет конечных значений коэффициентов усиления операционных усилителей дает на порядок меньший вклад в указанную погрешность. Установка передаточных коэффициентов и временных интервалов производилась с погрешностью порядка  $10^{-4}$  по цифровым приборам, что и позволило при оценке погрешностей учитывать лишь их нестабильность.

Для оценки сдвига  $V$  в зависимости от вводимого затухания, однородное уравнение (2.1) заменой переменных /4/ сводилось к уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами. Расчет показал, что при изменении времени затухания свободных колебаний от до 0,1 сек, сдвиг  $|\Delta V/V| \approx 7 \cdot 10^{-7}$ . Экспериментально измеренное время затухания, определяемое только неидеальностью частотных свойств элементов модели, составляет около 3 сек, что дает вклад в сдвиг  $V$  еще меньший, чем  $7 \cdot 10^{-7}$ . При измерении матричных элементов устанавливалось время затухания 0,1 сек.

Таким образом, в лабораторных условиях ( $\Delta t^\circ = 10^\circ\text{C}$ ), погрешность моделирования по частоте  $V$  составляет  $|\Delta V/V| \sim 3 \cdot 10^{-3}$  и определяется, в основном, точностью установки и стабильностью передаточных коэффициентов и временных интервалов.

Величина амплитуды частного решения, вызванного дрейфами усилителей, определялась экспериментально и составила 25 мв, то есть 1% от максимально возможной амплитуды напряжения.

Для достижения приведенных погрешностей моделирования приняты следующие меры. Введена компенсация входных токов операционных усилителей. Применена Г-образная схема ключей в группе  $K_7 - K_{12}$ , обеспечивающая в закрытом состоянии подавление сигнала более, чем в  $10^6$  раз. При переходе модели в режим решения ключи группы  $K_1 - K_6$  переключаются в следующем порядке: сначала размыкаются ключи  $K_5, K_6$ , затем происходит переключение остальных ключей.

Матричные элементы гармонической и точечной матриц измерялись для реально существующей расстановки 24 корректоров и 20 датчиков.

Измеренные значения матричных элементов гармонической и точечной матриц приведены, соответственно, в таблицах 1 и 2, а расстановка матричных элементов произведена в соответствии с формулами (1,5) и (1,7).

Матрицы наглядно иллюстрируют некоторые, физически понятные свойства исследуемой системы. В гармонической матрице наблюдается резонансность главной диагонали, а также слабое влияние четных гармоник на нечетные и наоборот. В точечной матрице наблюдается, в пределах ошибок измерений, следующее: каждый последующий столбец (строка) может быть получен из предыдущего столбца (строки) циклической перестановкой на один элемент, что является следствием симметрии кольцевой части накопителя. Исключение составляют строки и столбцы, относящиеся к прямолинейным промежуткам, где существует уже иная симметрия.

Измерение матричных элементов точечной матрицы производилось визуально по осциллографу, поэтому им приписана погрешность  $\pm 0,1$ .

В гармонической матрице наблюдается рост относительной (а иногда и абсолютной) погрешности с уменьшением модуля матричного элемента.

Величины погрешностей меняются при этом от  $5 \div 10\%$  до  $50 \div 100\%$  и более. Данные погрешности определялись, в основном, ошибками измерения амплитуд и фаз гармоник отклонения.

Так как при моделировании роль системы наблюдения и части системы коррекции выполняли запоминатели, имеющие погрешность порядка  $10^{-3}$ , то можно утверждать, что погрешности подобных измерений в реальной системе будут не меньше погрешностей моделирования.

В реальной системе скажутся такие погрешности как разброс чувствительности, нелинейности и другие ошибки датчиков и всей системы наблюдения, а также разброс коэффициентов передачи звеньев "усилитель мощности — корректирующее поле".

Матричные элементы нормировались в гармонической матрице на максимальный по модулю элемент, а в точечной — на усредненную ди-

агональ  $m_{11}, m_{22}, \dots, m_{88}, m_{11,13}, m_{12,14}, \dots, m_{18,20}$

Следует отметить одну особенность полученной гармонической матрицы. В модели пространственная расстановка корректоров и датчиков пропорционально отображается во временную, а в реальной системе коррекции и наблюдения раздача корректирующих сигналов и опрос датчиков ведется равномерно во времени, поэтому матрица, измеренная при прочих равных условиях на ВЭПП-3 имела бы несколько иной вид.

Полученные матрицы использовались при отладке программ счета этих же матриц на ЭВМ. Как для точечной, так и для гармонической матриц получено удовлетворительное совпадение с машинным расчетом.

### 5. Проверка модели и совместная работа с ЦВМ

Проверка модели была осуществлена с помощью тестов. Результаты показаны на фото 1-3.

Фото 1. Главные траектории прямолинейного промежутка: а) линзовая структура промежутка;

б) траектория движения "частицы" при начальных условиях

в) начальные условия

Фото наглядно иллюстрирует единичность матрицы перехода прямолинейного промежутка.

Фото 2. Главные траектории полукольца:

а) начальные условия

б) начальные условия

Фото 3. Тест "волна":

а) линзовая структура накопителя;

б) два возмущения, отличающиеся лишь знаком, введены на расстоянии в 5 элементов периодичности друг от друга;

в) искаженная равновесная орбита;

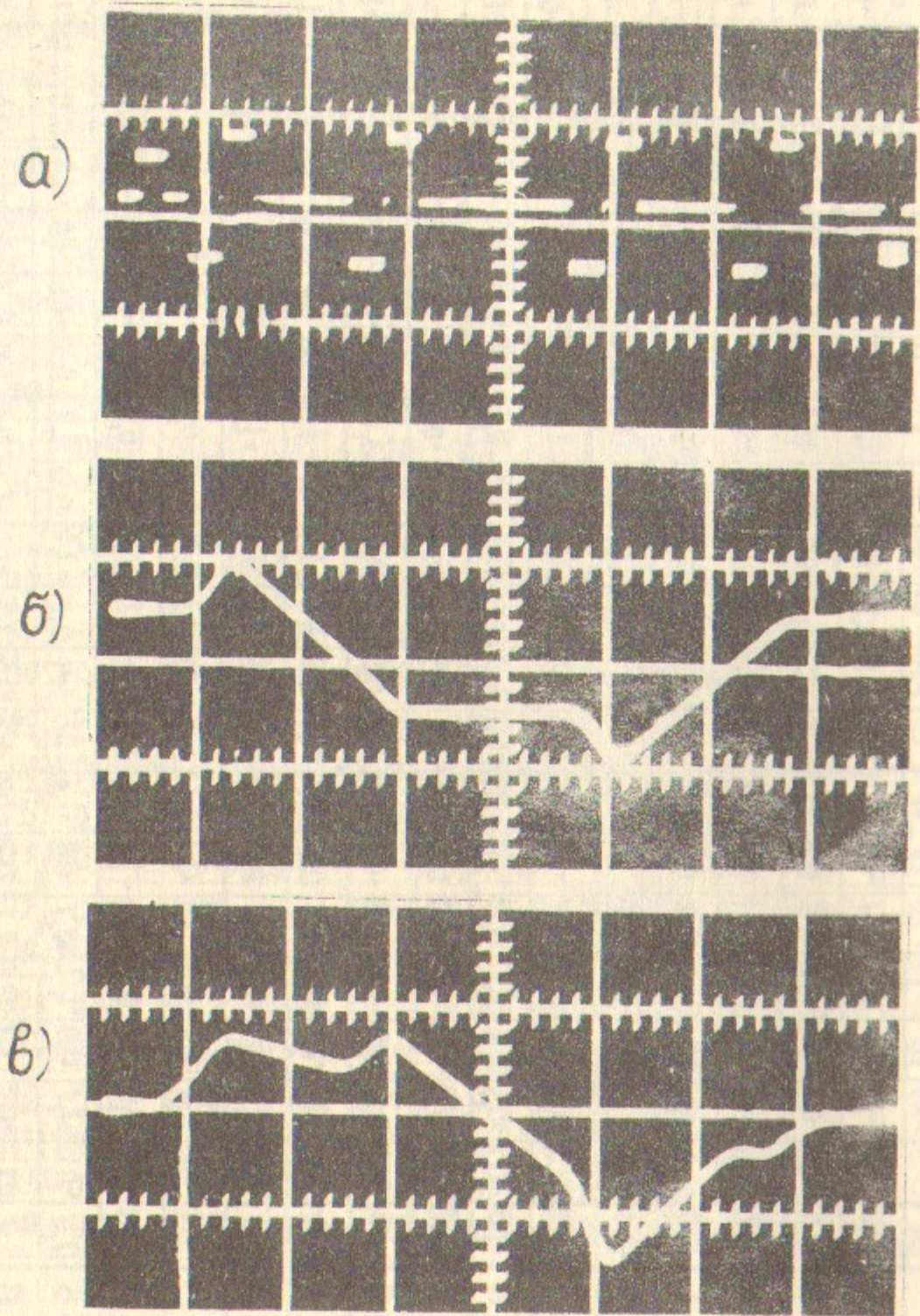
г) сигнал "системы наблюдения" (инвертирован). Тест демонстрирует близость частоты бетатронных колебаний ( $\nu_2 = 5,193$ ) к значению 5,2, так как при  $\nu_2 = 5,2$  на пяти элементах периодичности укладывается ровно одна волна бетатронных колебаний.

На модели была опробована коррекция орбиты с помощью ЦВМ. В программе коррекции использовались матрицы, полученные машинным расчетом из экспериментально полученной  $\beta$ -функции аналоговой модели. В модель вводились возмущения, а отклонения орбиты считывались с осциллографа и вводились в ЦВМ через телетайп. Затем вычисленные машиной значения корректирующих воздействий вводились вручную в модель. Эти процедуры составляют один шаг коррекции. Корректировались три вида возмущений: а) возмущение сосредоточено в одном корректоре; б) возмущение сосредоточено в двух корректорах; в) возмущение распределено по элементу периодичности. Во всех трех случаях возмущение имело вид прямоугольного импульса. В ЦВМ вводились при этом дополнительные условия: а) имеются все корректоры; б) отсутствует корректор, в месте расположения или вблизи которого введено возмущение.

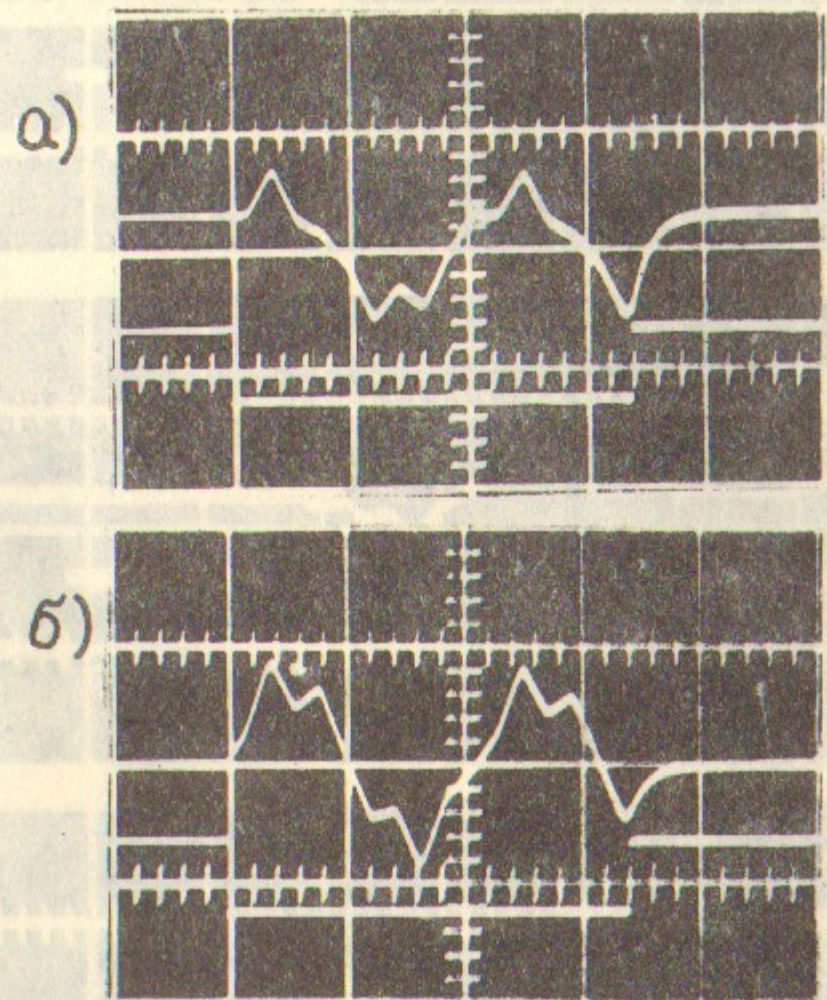
Во всех ситуациях среднеквадратичное отклонение орбиты уменьшалось в 10 и более раз после первого же шага коррекции. Уменьшение среднеквадратичного отклонения орбиты, но уже значительно меньшее, наблюдалось также на втором и третьем шаге коррекции. Дальнейшие шаги были бесполезны, т.к. давали коррекцию в пределах точности эксперимента (10%). Полученные результаты позволяют утверждать, что в настоящее время возможно достаточно оперативное проведение коррекции равновесной орбиты на ВЭПП-3 с использованием ЦВМ в качестве советчика. При связи ЦВМ с системой коррекции и наблюдения через цифроаналоговые и аналогоцифровые преобразователи естественно ожидать улучшения сходимости процесса многошаговой коррекции и уменьшения конечного среднеквадратичного отклонения равновесной орбиты.

Авторы выражают благодарность П.Б.Лысяжскому, принимавшему активное участие в работе.





ΦΟΤΟ 1.



ΦΟΤΟ 2.

Ε. ΟΤΟΦ

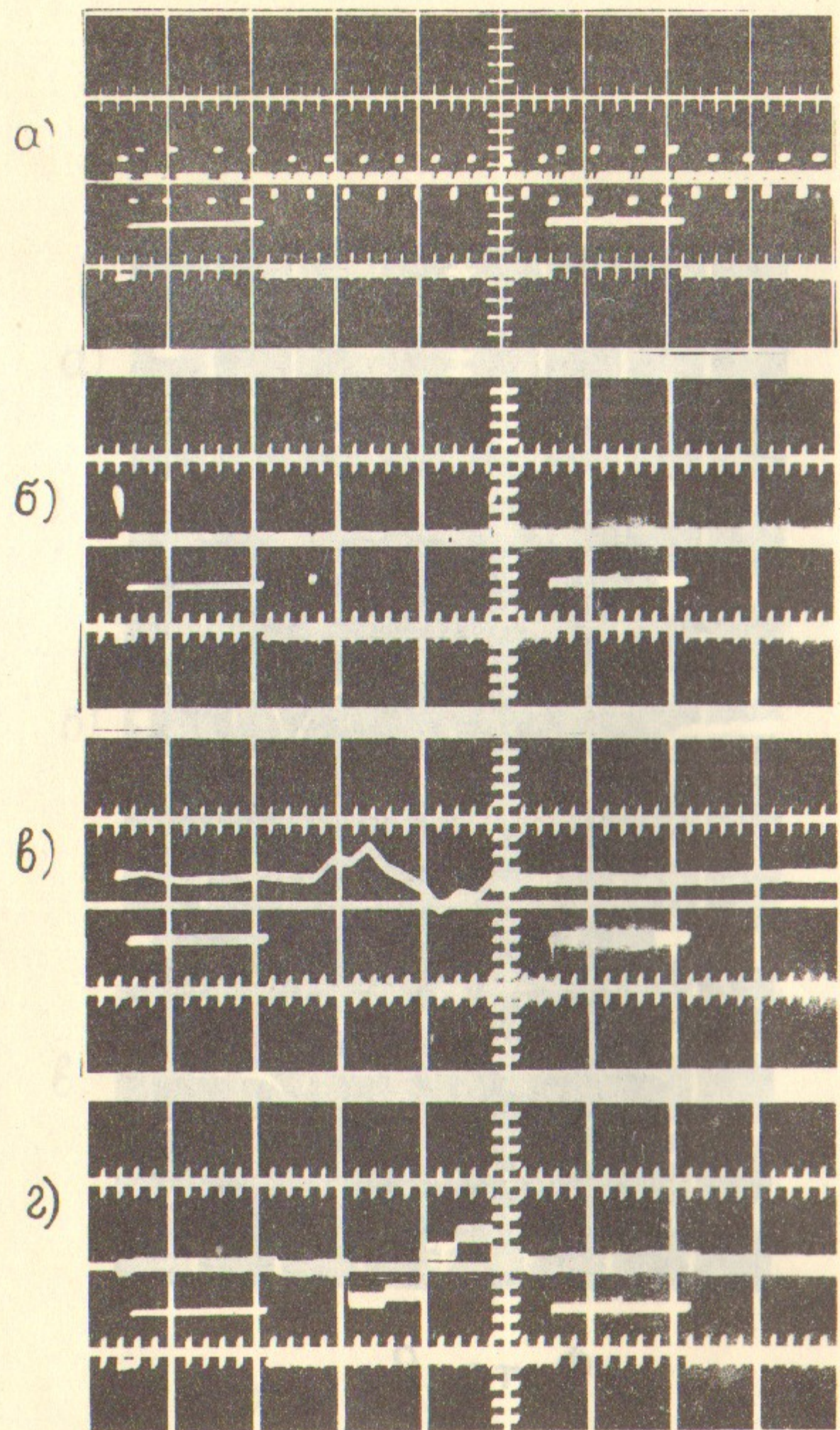


Фото 3.

### Л и т е р а т у р а

1. И.И.Авербух, В.М.Боровиков, М.М.Карлинер, А.С.Медведко, И.Я.Протопопов. Система коррекции положения равновесной орбиты в накопительном кольце ВЭПП-3, препринт ИЯФ СО АН СССР, 1970 г.
2. А.С.Калинин, М.М.Карлинер, А.С.Медведко. Система контроля положения равновесной орбиты в накопительном кольце ВЭПП-3, препринт ИЯФ СО АН СССР, 1970 г.
3. И.Я.Протопопов. Электрон-позитронный накопитель ВЭПП-3, кандидатская диссертация, Новосибирск, 1970 г.
4. Г.Брук. Циклические ускорители заряженных частиц. Атомиздат. Москва, 1970.
5. Б.А.Гудков. Аналоговая модель равновесной орбиты пучка в накопителе ВЭПП-3. Дипломная работа, НГУ, 1971.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Постановка задачи.....	3
2. Структура аналоговой модели.....	6
а) Аналоговый вычислитель.....	6
б) Вреязадающее устройство.....	8
в) Устройства, моделирующие корректоры и систему на- блюдения.....	10
3. Масштабные коэффициенты и передаточные коэффициенты отдельных звеньев.....	11
4. Погрешности моделирования.....	13
5. Проверка модели и совместная работа с ЦВМ.....	16
6. Литература.....	23

---

Ответственный за выпуск С.Н.РОДИОНОВ  
Подписано к печати 27.12.73г. МН 17085  
Усл. 1,5 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно  
Заказ № 114. ПРЕПРИНТ.

---

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, вг.