

P9-2023-50

В. Н. Семенов, В. С. Рихвицкий, А. Н. Лихачев,  
Р. Ш. Исаев, А. С. Дорошкевич

СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
И СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ  
ИОННОГО ПУЧКА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ **ЭГ-5**

Семенов В. Н. и др.

P9-2023-50

Система позиционирования и стабилизации положения ионного пучка для ускорителя ЭГ-5

В рамках проекта модернизации ускорителя ЭГ-5 авторами на основе четырех токовых датчиков и электромагнитной отклоняющей системы разработана автоматизированная система позиционирования и стабилизации положения ионного пучка (АСПСИП) в ионопроводе электростатического ускорителя (ЭСУ) ЭГ-5.

Проведены расчеты, моделирование процессов в электрических цепях, испытания на оптическом макете.

Рассмотрены принцип действия системы, основные элементы, результаты моделирования и предложения по развитию данной опции.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2023

Semyonov V. N. et al.

P9-2023-50

Ion Beam Positioning and Position Stabilization System for EG-5 Accelerator

As part of the project of modernization of the EG-5 accelerator, the authors of the report, based on 4 current sensors and an electromagnetic deflection system, developed an automated system for positioning and stabilizing the position of the ion beam (ASPSIB) in the ion pipe of the electrostatic accelerator (ESA) EG-5.

Calculations, modeling of processes in electrical circuits, and tests on an optical model were carried out.

The principle of operation of the system, main elements, modeling results and proposals for the development of this option are considered.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Система на базе электронных узлов должна обеспечивать в автоматическом режиме контроль формы, пространственное позиционирование и автоматическое удержание пучка высокоэнергетических заряженных частиц в центре сечения ионопровода канала 2 ускорителя ЭГ-5 вблизи выхода на мишень.

Разработку системы нужно проводить в три этапа. На первом этапе автоматизированная система должна работать автономно, позиционирование осуществляется посредством оперативных регулировок с использованием аналоговых сигналов. Последующее усложнение на втором этапе должно обеспечить позиционирование пучка (возможно, удержание в центре ионопровода) с использованием ЭВМ и соответствующего программного обеспечения.

На третьем этапе должна быть разработана система формирования centrosимметричного пучка с возможностью компьютерного управления, контроля и автоматического удержания заданной формы пучка.

В системе не предполагается замена имеющихся узлов ЭГ-5, а будет создана соответствующая автономная инфраструктура или переключение исполнительных устройств с оригинальных управляющих модулей на разрабатываемые модули с функцией автоматического позиционирования и удержания пучка с возможностью возврата элементов ускорителя в исходное состояние.

### 1. ОБЩАЯ СХЕМА ЭГ-5

На рис. 1 представлена схема ЭГ-5, на которой отмечены датчик положения пучка перед облучаемым образцом и создающая корректирующее магнитное поле катушка примерно за 3 м до него.

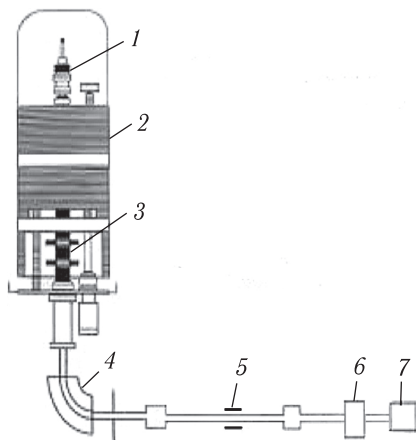


Рис. 1. Общая схема ЭГ-5: 1 — ионный источник; 2 — электростатический ускоритель; 3 — ускорительная трубка; 4 — анализирующий магнит; 5 — отклоняющие катушки; 6 — датчик положения пучка; 7 — камера для образцов

## 2. ВИЗУАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

До сего времени для позиционирования пучка оператору на пульт передавалось изображение следа пучка на стеклянной пластинке из кварцевого стекла, вставленной на пути пучка в ионопроводе (рис. 2). Такая возможность, по-видимому, останется и в дальнейшем.

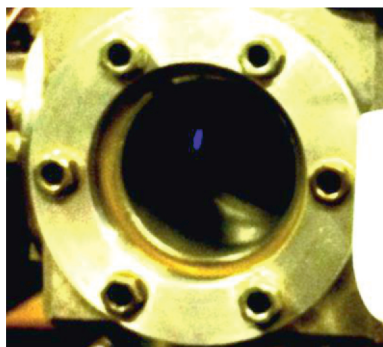


Рис. 2. Стеклянная пластина из ламинированного кварцевого стекла, помещенная в камеру на пути ускоренного пучка. Используя визуальную информацию о положении пучка в канале, оператор, вручную вращая ручки лабораторных автотрансформаторов, меняет на большой магнитной линзе питающее напряжение, корректирует позицию пучка в канале

## 3. СХЕМА УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Обратная связь от датчика положения пучка к отклоняющей катушке замыкает следящую систему автоматического позиционирования. Эта схема обеспечит точное позиционирование, но работать она будет после ручного выведения пучка в область захвата (рис. 3).

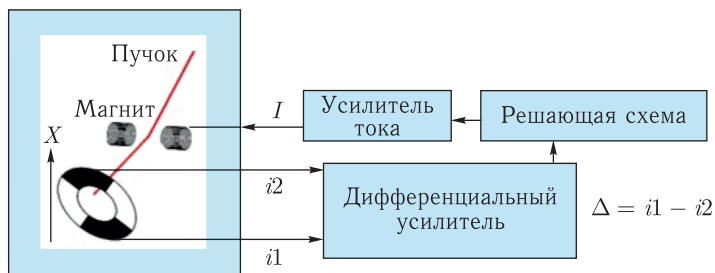


Рис. 3. Схема системы автоматического управления положением пучка

#### 4. ТОКОВЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА И УРАВНЕНИЕ СЛЕЖЕНИЯ

Датчик состоит из проводящих пластин по бокам от пучка (рис. 4). Действие датчика положения пучка основано на наличии «крыльев» в профиле статистического распределения частиц в пучке. Предполагается, что это распределение гауссово. Разность токов  $\Delta$  оседающих на пластинах зарядов будет нулевой, только когда пучок проходит точно по центру ионопровода (рис. 5).

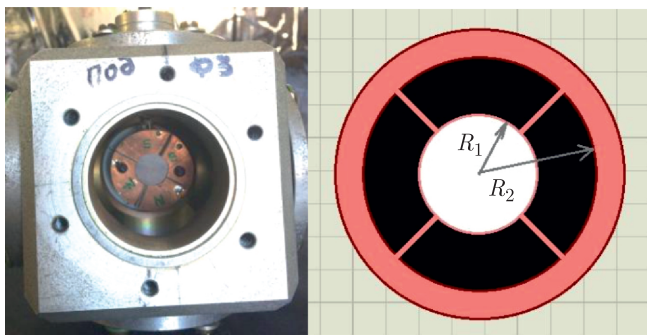


Рис. 4. Детектор положения пучка. Внутри видны четыре сектора (по двум координатам), на которых осаждаются боковые частицы пучка ( $R_1 = 1$  см,  $R_2 = 2,25$  см)

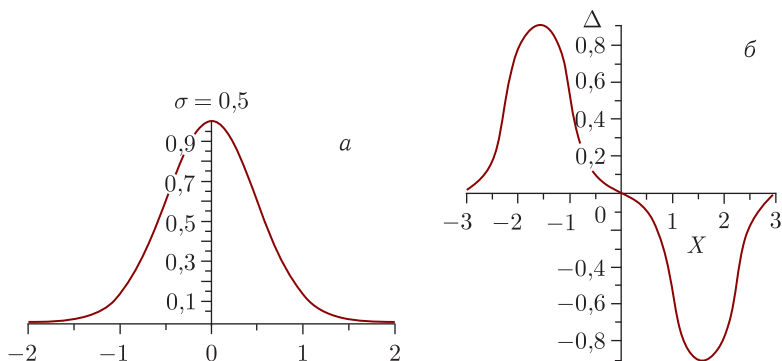


Рис. 5. а) Распределение (гауссово) плотности частиц в профиле пучка; б) зависимость разности токов пластин датчика от смещения пучка. Шириной пучка считается  $2\sigma$ . Результат расчета — ток  $\Delta$  [нА] при  $\sigma = 0,5$  см

Реализующая обратную связь схема слежения описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d}{dt}I = -K\Delta(X). \quad (1)$$

Неподвижная (предельная) точка решения  $\Delta = 0$ , т.е. пучок находится в центре.

## 5. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА

Все параметры пучка, необходимые для расчета эффективности датчика, находятся из уравнений

$$2 \text{ МэВ} = T = \frac{m_p c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_p c^2, \quad (2)$$

$$\beta = v/c, \quad (3)$$

$$1 \text{ мкА} = I = v\rho, \quad (4)$$

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}, \quad m_p = 938 \text{ МэВ}/c^2.$$

Решение:  $\beta = 0,065$ ,  $v = 1,956 \cdot 10^9 \text{ см/с}$  — скорость частиц,  $\rho = 5 \times 10^{-16} \text{ Кл/см}$  — плотность пучка.

## 6. УРАВНЕНИЕ СЛЕЖЕНИЯ

Уравнение полной системы

$$\frac{d}{dt}I = -K\Delta(X), \quad \frac{d}{dt}X = -K_x \frac{d}{dt}I, \quad (5)$$

где  $K_x$  — способность магнита управлять пучком, будет описывать следящую систему, которая из любого начального условия  $X(0)$  установит через некоторое время ток, совмещающий центр пучка с центром датчика, как показано на рис. 6.

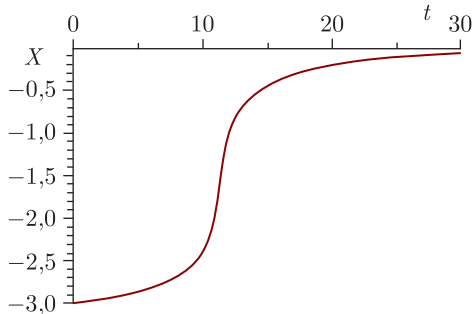


Рис. 6. Начальное отклонение центра пучка  $X(0) = -6\sigma$ , т.е. за пределами датчика

## 7. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ, ИНТЕГРИРУЮЩИЙ И ТОКОВЫЙ УСИЛИТЕЛИ

Блок электроники, реализующий аналоговое решение дифференциального уравнения обратной связи, состоит из операционных усилителей и выходного мощного полевого транзистора (рис. 7).

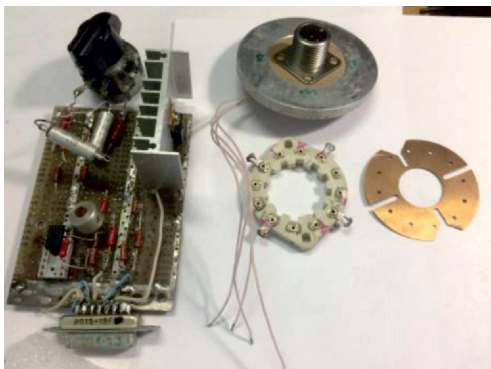


Рис. 7. Блок дифференциального, интегрирующего и токового усилителей и элементы датчика

## 8. ОТКЛОНЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Один экземпляр отклоняющей системы был установлен на 2-м канале ЭГ-5 на расстоянии 3 м от мишени. Измеренная сила тока в катушках 1–2 А достаточна для отклонения пучка в требуемых пределах (рис. 8).

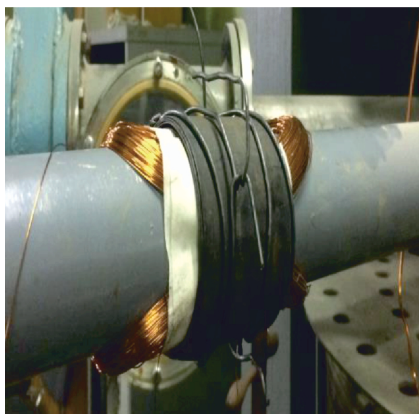


Рис. 8. Экземпляр отклоняющей системы

Расчеты величины угла отклоняющего магнитного поля для тяжелых ионов пучка позволили определить количество витков и сечение провода отклоняющих катушек и стального магнитопровода, включенных в схему (рис. 9).

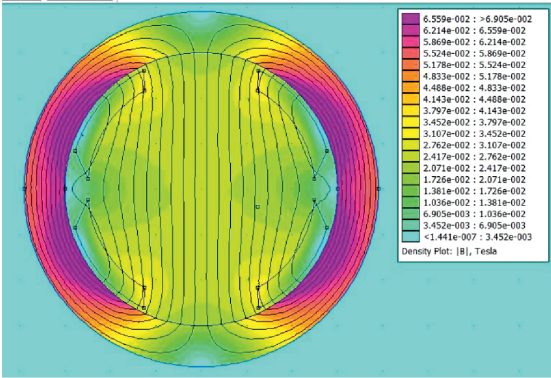


Рис. 9. Расчетное распределение магнитного поля в сечении канала пучка. Обмотки обернуты стальной лентой, благодаря чему поле в сечении однородно распределено

**8.1. Геометрическая конфигурация.** На рис. 10 показана геометрическая конфигурация обмоток отклоняющих катушек для расчета магнитного поля.

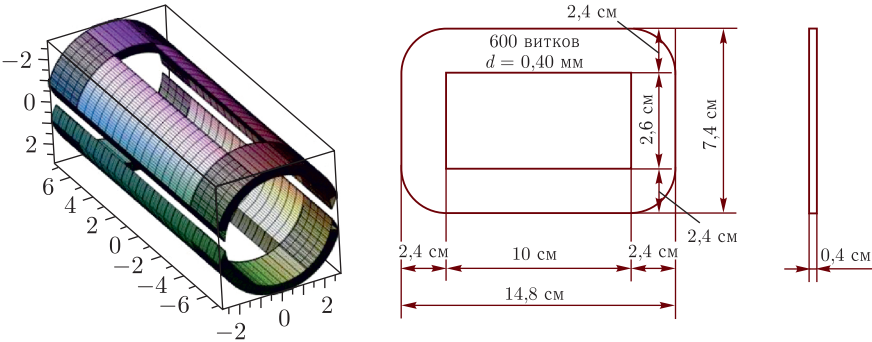


Рис. 10. Геометрическая конфигурация обмоток

**8.2. Электродинамика.** Отклонение траектории заряженной частицы в плоскости  $X$  рассчитывается как проекция на плоскость интеграла кривизны траектории:

$$\alpha = \left( \int_{z_0}^z \mathbf{a}(z) dz \right)_X \tag{6}$$



В свою очередь, кривизна является результатом действия силы Лоренца в магнитном поле:

$$\mathbf{a} = \frac{e}{p} [\mathbf{V}, \mathbf{B}]. \quad (7)$$

Магнитное поле в точке  $\mathbf{P}$  рассчитывается по формуле Био–Савара–Лапласа

$$\mathbf{B}(\mathbf{P}) = IN \int_{\mathbf{r} \in \Gamma} \frac{[d\mathbf{r}, \mathbf{P} - \mathbf{r}]}{|\mathbf{P} - \mathbf{r}|^3}, \quad (8)$$

где  $\Gamma$  — электропроводящий контур из  $N$  витков с током  $I$ .

**8.3. Вычисление кривизны.** При движении материальной точки  $\mathbf{P}$  уравнение Ньютона

$$\frac{d}{dt} \mathbf{p} = \mathbf{F} \quad (9)$$

связывает вектор импульса  $\mathbf{p}$  с вектором силы  $\mathbf{F}$ :

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}, \quad \mathbf{v} = \frac{d}{dt} \mathbf{P}, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}, \quad v = |\mathbf{v}|, \quad p = |\mathbf{p}|. \quad (10)$$

Жирным шрифтом будем и далее обозначать векторы, обычным — числовые величины.

$\mathbf{P}$  зависит от  $t$  не непосредственно, а через функцию пройденного пути  $s(t)$  (натуральный параметр):

$$\mathbf{v} = \frac{d}{dt} \mathbf{P}(s(t)), \quad \frac{d}{dt} \mathbf{P} = \frac{d\mathbf{P}}{ds} \frac{ds}{dt}, \quad \frac{d\mathbf{P}}{ds} = \mathbf{V}, \quad \frac{ds}{dt} = v, \quad (11)$$

т. е. скорость  $\mathbf{v}$  представлена в виде произведения единичного касательного вектора направления  $\mathbf{V}$  и величины скорости  $v$ :

$$\mathbf{v} = \mathbf{V}v, \quad |\mathbf{V}| = 1. \quad (12)$$

Поскольку  $|\mathbf{V}| = 1$ , то

$$\frac{d\mathbf{V}}{ds} = a\mathbf{n}, \quad |\mathbf{n}| = 1, \quad \mathbf{n} \perp \mathbf{V}, \quad (13)$$

где  $\mathbf{n}$  называется нормалью,  $a$  — кривизной,  $a\mathbf{n}$  — вектором кривизны.

Распишем

$$\frac{d}{dt} \mathbf{p}(s(t)) = \frac{ds}{dt} \frac{d}{ds} \frac{m_0 \mathbf{V}v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \quad (14)$$

$$= v \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \frac{d\mathbf{V}}{ds} + \mathbf{V}v \frac{d}{ds} \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \quad (15)$$

$$= pva\mathbf{n} + \mathbf{V}v \frac{dp}{ds}. \quad (16)$$

Движение частицы происходит в магнитном поле. Сила  $\mathbf{F}$  включает силу Лоренца:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_T, \quad (17)$$

где  $\mathbf{F}_L$  — сила Лоренца ( $\parallel \mathbf{n}$ ),  $\mathbf{F}_T$  — тормозящая сила ( $\parallel \mathbf{V}$ ).

Сила Лоренца описывается выражением

$$\mathbf{F}_L = ze[\mathbf{v}, \mathbf{B}] = ze[\mathbf{V}v, \mathbf{B}] = zev[\mathbf{V}, \mathbf{B}]. \quad (18)$$

Здесь  $ze$  — заряд частицы;  $\mathbf{B}$  — индукция магнитного поля;  $[\ast, \ast]$  — векторное произведение.

Сравнивая (16) и (18) и принимая во внимание, что  $[\mathbf{V}, \mathbf{B}] \perp \mathbf{V}$ , пишем

$$zev[\mathbf{V}, \mathbf{B}] = p\mathbf{v}\mathbf{a}\mathbf{n}, \quad (19)$$

откуда находим вектор кривизны, который является производной единичного вектора направления  $\mathbf{V}$  по натуральному параметру  $s$ :

$$\frac{d\mathbf{V}}{ds} = \mathbf{a}\mathbf{n} = \frac{ze}{p}[\mathbf{V}\mathbf{B}]. \quad (20)$$

## 9. АНАЛОГОВАЯ РЕШАЮЩАЯ СХЕМА. БЛОК УСИЛИТЕЛЕЙ

На рис. 11 представлена схема усилителей. Выполняемая формула (обратной связи):

$$\frac{d}{dt}U_{out} = \frac{1}{R_6C}[U_{ref} - k_1k_2(R_1||R_2)(In_1 - In_2)], \quad k_1 = \frac{R_3}{R_2}, \quad k_2 = \frac{R_6}{R_5}.$$

Схема была создана и проверена с помощью моделирования в пакете Proteus-8.

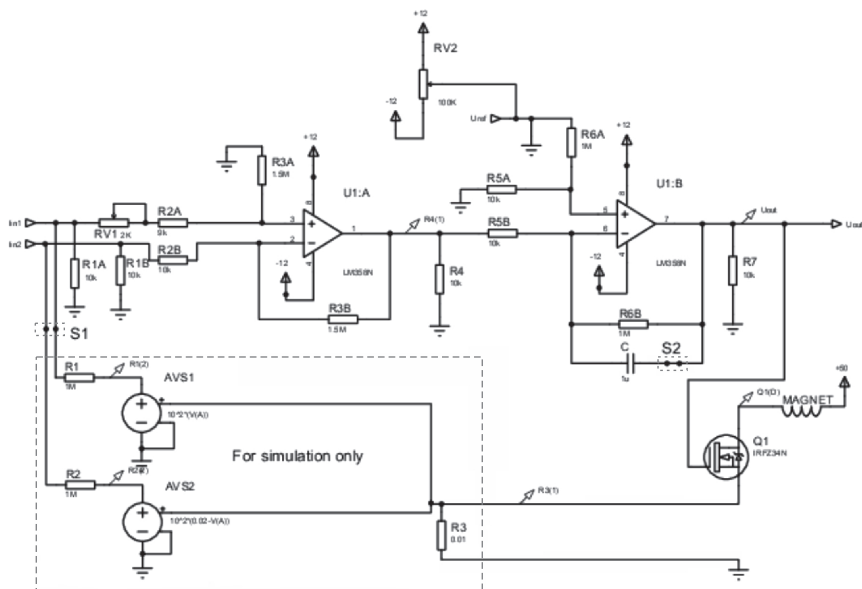


Рис. 11. Схема блока усилителей

## 10. МАКЕТ

Макет изготовлен для отработки и проверки управления током магнитных катушек дифференциальным усилителем сигнала и реальных питающих напряжений, таких же, как на установленном отклоняющем устройстве на 2-м канале ЭГ-5 (рис. 12). Пучок ионов в макете заменен лазерным лучом света в виде лазерной указки, закрепленной на стальной линейке, которая изменяет свое положение при включении питания катушек под воздействием управляемого дифференциального усилителя тока в катушках.



Рис. 12. Макет

Таким образом, обратная связь через усилитель управляет позицией светового пятна между фотоприемниками.

Использование макета позволило проверить работоспособность электроники и коэффициента усиления дифференциального усилителя.

**10.1. Уравнения движения.** Макет-маятник отличается от пучка частиц наличием инерционности:

$$\frac{d}{dt}x = v, \quad \frac{d}{dt}v = -\omega^2 x - By - \frac{A}{R-x}z, \quad (21)$$

$$\frac{d}{dt}z = K\Delta(x), \quad (22)$$

где  $x$  — позиция маятника;  $v$  — скорость изменения позиции  $x$ ;  $z$  — ток магнита;  $\omega$  — частота маятника;  $A$  — эффективность магнита;  $B$  — демпфирование. На рис. 13 показана функция  $\Delta(x)$ .

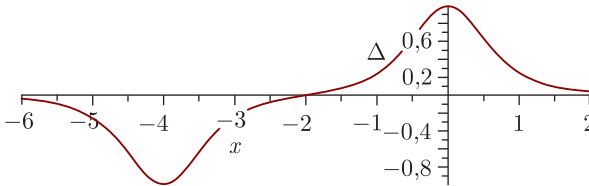


Рис. 13.  $\Delta(x)$  — функция токового датчика позиции

**10.2. Проблема устойчивости движения.** Следствием инерционности макета-маятника является возможность развития неустойчивости движения. Рис. 14 иллюстрирует устойчивое движение маятника.

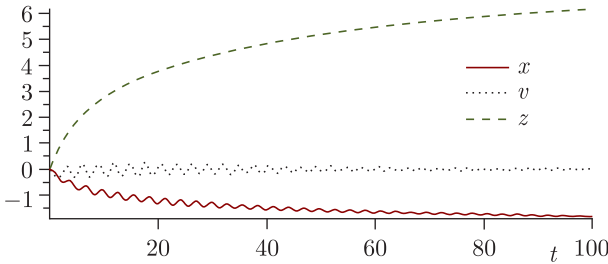
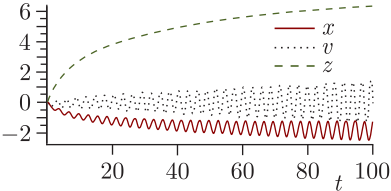
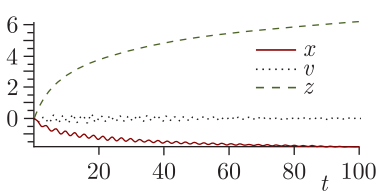
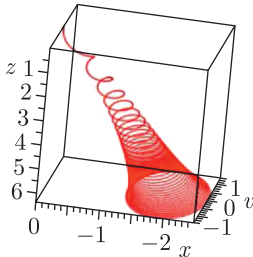
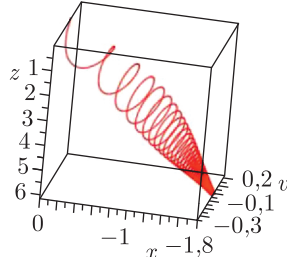


Рис. 14. Управление устойчиво при  $\omega = 2$ ,  $K = 0,5$ ,  $A = 8$ ,  $B = 0,8$ ,  $R = 5$

Характерные расчетные случаи неустойчивого и устойчивого движения маятника при различных параметрах приведены в таблице.

Неустойчивое решение	Устойчивое решение
$\omega = 2, \quad K = 0,5,$ $A = 8, \quad B = 0,$ $R = 5$	$\omega = 2, \quad K = 0,5,$ $A = 8, \quad B = 0,8,$ $R = 5$

Окончание таблицы

Корни характеристического уравнения в неподвижной (предельной) точке	Корни характеристического уравнения в неподвижной (предельной) точке
$\lambda_{1,2} = 0,007 \pm 2,3i,$ $\lambda_3 = -0,014$	$\lambda_{1,2} = -0,03 \pm 2,3i,$ $\lambda_3 = -0,014$
	
Неустойчивое решение	Устойчивое решение
	

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Была спроектирована и проверена схема автоматизации позиционирования пучка, при этом

- изготовлен токовый датчик положения пучка;
- собрана и проверена электронная схема обратной связи;
- рассчитана, изготовлена и проверена на реальном пучке катушка отклоняющего магнита;
- проверена на макете работа целой системы с реальными электроникой и отклоняющим магнитом.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Бонштедт Б.Э., Маркович М.Г.* Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. М.: Сов. радио, 1967.
2. *Вейцель В.А. и др.* Радиосистемы управления. М., 2005.
3. *Беньковски А.* Стабилизатор положения пучка ионов в электростатическом ускорителе ЭГ-5. Сообщ. ОИЯИ Р9-83-885. Дубна, 1983.
4. *Алферов В.Н., Осетинский Г.М., Чепурченко М.А.* Электростатический генератор ОИЯИ. Сообщ. ОИЯИ Р9-2923. Дубна, 1967.

Получено 5 октября 2023 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 09.11.2023.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,7. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ № 60770.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)