

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИЗАТОРА ЗАМКНУТЫХ ОРБИТ НА ЭЛЕМЕНТАХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ АВМ

В. А. КОЧЕГУРОВ, Э. Е. ИВАНЧЕНКОВА

(Представлена семинаром каф. ПМ)

Контроль замкнутых орбит имеет важное значение в ускорителях на высокие энергии, так как различные возмущения магнитного поля вызывают искажения замкнутых орбит и приводят к уменьшению интенсивности пучка ускоренных частиц. Трудности аналитических методов анализа замкнутых орбит заключаются в том, что небольшие погрешности в измерении координат могут приводить к расходящимся решениям при определении возмущений магнитного поля. Такая задача относится к классу «некорректных задач», численное решение которых основано на применении различных методов сглаживания. В статье рассматриваются вопросы разработки и исследования аналогового вычислительного устройства, позволяющего по результатам измерений параметров замкнутой орбиты осуществить локализацию дипольных возмущений магнитного поля, которые могут возникать, в частности, за счет смещения периодических элементов магнитной системы от идеальной орбиты. Согласно теории «сглаженных» замкнутых орбит совокупность истинных траекторий частиц заменяется усредненной траекторией центра пучка по некоторому эквивалентному кругу. Дифференциальное уравнение «сглаженного» движения имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dv^2} + Q^2x(v) = \delta(v), \quad (1)$$

где  $x$  — координата поперечного (радиального или вертикального) колебания;

$v$  — азимутальный угол;

$Q$  — число свободных колебаний за 1 оборот;

$\delta(v)$  — возмущение магнитного поля.

При

$$\delta(v) = \begin{cases} k & \text{при } v, < v_2 \\ 0 & \text{везде} \end{cases}$$

решением дифференциального уравнения (1) будет:

$$x(v) = c_1 \cos Qv + c_2 \sin Qv + \frac{1}{Q^2} \delta(v) (1 - \cos Qv). \quad (2)$$

Таким образом, координаты замкнутой орбиты представляют собой гармонические колебания с наложенными возмущениями, пропорциональными  $\delta(v)$ .

Измерение замкнутой орбиты ускорителей с сильной фокусировкой производится с помощью дискретных датчиков, расположенных определенным образом вдоль равновесной орбиты. Поэтому вычислительное устройство для анализа замкнутых орбит должно содержать не-

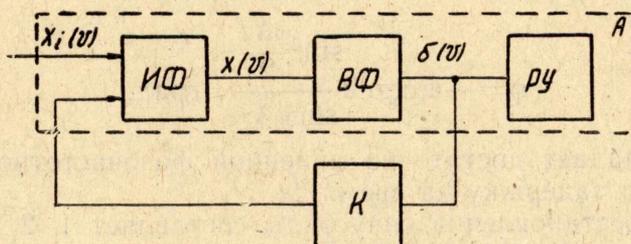


Рис. 1. Блок-схема замкнутой системы анализа и компенсации нарушения магнитного поля.

- А — анализатор замкнутых орбит;  
 ИФ — интерполирующий фильтр;  
 РУ — регистрирующее устройство (индикатор);  
 К — устройство, корректирующее возмущение магнитного поля

который интерполирующий фильтр, на вход которого поступает информация в дискретной форме о параметрах сглаженной замкнутой орбиты, и вычислительный фильтр, исключаящий из сигнала, пропорционального координатам орбиты пучка, колебания, определяемые числом  $Q$ .

Блок-схема замкнутой системы анализа и компенсации возмущения дана на рис. 1.

### 1. Интерполирующий фильтр

При решении задач интерполяции важное значение имеет правильный выбор темпа отсчета координат замкнутой орбиты (расположение датчиков вдоль орбиты). Интервал дискретизации устанавливается теоремой Котельникова, согласно которой любая функция  $f(t)$ , состоящая из частот от 0 до  $f_c$  (высшая гармоника сигнала), может быть представлена с достаточной точностью при помощи чисел, следующих через интервалы  $\Delta t = \frac{1}{2f_c}$  сек.

В соответствии с теоремой идеально восстанавливающим является фильтр, имеющий импульсную переходную характеристику:

$$g(t) = \frac{\sin \omega_c(t - k \Delta t)}{\omega_c(t - k \Delta t)}$$

Ввиду физической нереализуемости такого фильтра в практике используется ряд схем, имеющих приближенные импульсные переходные характеристики. Нами для исследования был выбран фильтр с передаточной функцией [1]:

$$W(p) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{1 - e^{-p \Delta t}}{p} \quad (3)$$

Его логарифмические амплитудночастотная и фазочастотная характеристики имеют вид:

$$L(\omega) = 20 \lg \Delta t \left( \frac{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}{\frac{\omega \Delta t}{2}} \right), \text{ дб.}$$

$$\varphi = -\operatorname{arctg} 2 \frac{\sin^2 \frac{\omega \Delta t}{2}}{\sin \omega \Delta t}, \text{ град.} \quad (4)$$

Фильтр обладает достаточно линейной фазочастотной характеристикой, но вводит задержку на время  $\Delta t$ .

Точность восстановления синусоиды составляет 1, 2, 5% при числе отсчетов за период  $N=22; 16; 10$ .

## 2. Вычислительный фильтр

Его передаточная функция может быть получена из уравнения (1) и имеет вид:

$$W(p) = \frac{p^2 + \omega_0^2}{(p + \omega_1)^2}. \quad (5)$$

Фильтр характеризуется наличием двух нулей на мнимой оси ( $p_{1,2} = \pm \omega_0$ ) и двукратного полюса затухания, расположенного на вещественной оси ( $P_{1,2} = \pm \omega_1$ ). Логарифмические частотные характеристики вычислителя имеют вид.

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{\frac{\omega_0^2}{\omega_1^2} \left| \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \right|}{1 + \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}, \text{ дб.}$$

$$(6)$$

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \frac{2\omega}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}, \text{ град.}$$

Структурная схема анализатора, содержащая интерполирующий фильтр ИФ и вычислитель ВФ, дана на рис. 2. Исследования проводились при различных значениях полюсов затухания  $\omega_1$  передаточной функции вычислительного фильтра, настроенного на частоту свободных колебаний  $\omega_0$ . При этом замкнутая орбита была реализована на блоках АВМ в соответствии с уравнением (1). Возмущения магнитного поля  $\delta$  представлялись на блоке переменных коэффициентов со ступенчатой аппроксимацией. Независимая переменная  $v$  изображается в модели машинным временем  $\tau_m$ , а возмущение  $\delta_{(v)}$  и зависимая переменная  $x$  — напряжением.

Связь между машинными переменными вычислителя и замкнутой орбиты описывается уравнениями:

$$\tau_M = m_v \cdot v, \quad Q^2 = \omega_0^2 m_v^2, \text{ где}$$

$$U_6 = m_6 \cdot \delta(v), \quad \omega_0^2 = \alpha_5 \alpha_7 \alpha_{10} k_{41} k_{51} k_{62} \frac{m_x}{m_6}.$$

$$U_x = m_x \cdot x(v).$$

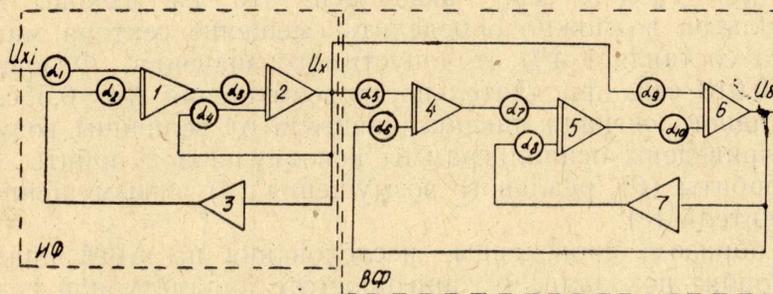


Рис. 2.

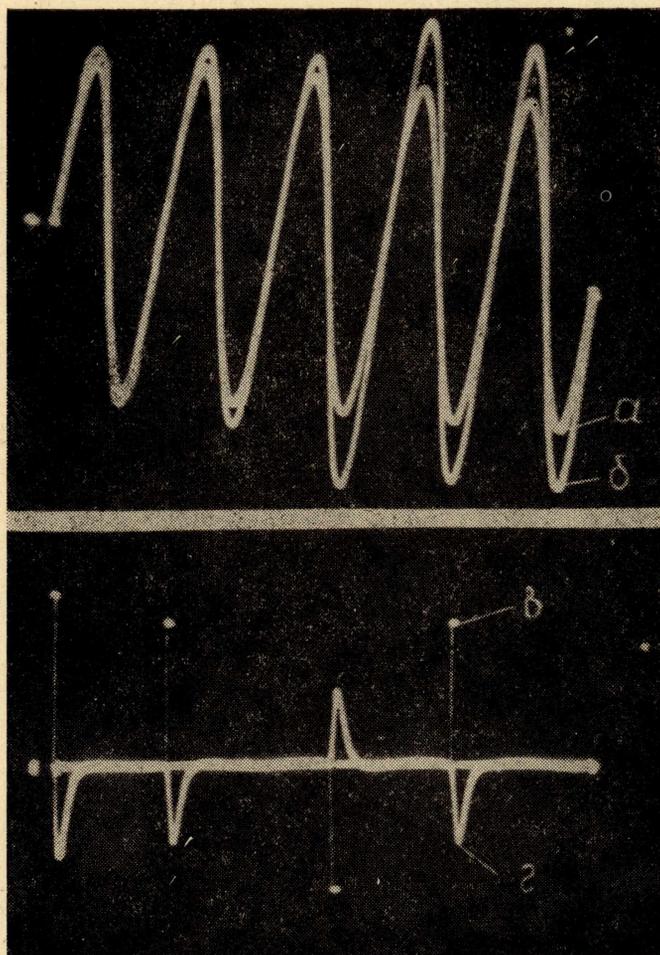


Рис. 3.

Было получено, что с увеличением полюса  $\omega_1$  чувствительность вычислителя уменьшается. При этом также уменьшаются фазовые сдвиги, которые позволяют судить о точности локализации возмущений магнитного поля. Выбор оптимального значения полюса затухания  $\omega_1$  определяется требованиями к точности локализации и к чувствительности системы. В частности, при использовании в качестве исходных параметры магнитной системы Ереванского синхротрона [2]:  $Q=5,4$ ;  $n=48$  — число пар периодических элементов;  $\Delta x=0,5$  мм, — допустимое поперечное смещение блока;  $A=20$  мм — допустимая амплитуда бетатронных колебаний, при  $\tau_m=50$  сек. — оказалось, что на выходе вычислительного фильтра возможно определить смещение сектора магнита на 0,02 мм, что составляет 4% от допустимого значения. Фазовый сдвиг был равен 0,013 сек. при длительности возмущения  $\Delta t=0,5$  сек, а величина выходного сигнала линейно зависела от величины возмущения. На рис. 3 приведены осциллограммы невозмущенной орбиты (а), возмущенной орбиты (б), реального возмущения (в) и возмущения на выходе вычислителя (г).

Таким образом, проведенные исследования на АВМ анализатора замкнутых орбит показали, что при простоте аппаратной реализации он может быть успешно применен для непрерывного контроля замкнутых орбит и для автоматической компенсации возмущений при наличии соответствующего количества датчиков, измеряющих в дискретных точках координаты замкнутой орбиты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хьюлсман. Активные фильтры. М., 1972.
2. Труды международной конференции по ускорителям. Под ред. А. А. Коломенского, А. Б. Кузнецова, А. Н. Лебедева. М., Атомиздат, 1964.