

**К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ  
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ  
ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

А. А. ВОРОБЬЕВ, В. А. КОЧЕГУРОВ, А. С. ОГОРОДНИКОВ

(Представлена научным семинаром АВТА)

В последнее десятилетие появилось много работ по исследованию различных неустойчивых типов колебаний интенсивных пучков заряженных частиц. Проблема подавления неустойчивости является весьма важной, и ее решение позволит резко повысить интенсивность пучков.

Заметим, что эта задача является одной из сторон более общей проблемы устойчивого удержания интенсивного пучка на равновесной орбите. Попытка компромиссного решения задачи обеспечения равновесия и задачи стабилизации путем выбора полей специальной конфигурации и заранее задаваемого закона их изменения во времени приводит к неоправданно большим энергетическим затратам (например, динамическая стабилизация плазмы). Дело в том, что равновесные конфигурации, отвечающие требованиям экономичности, оказываются неустойчивыми, а устойчивые конфигурации — экономически невыгодными. Таким образом, с одной стороны необходимо искать экономичные методы обеспечения равновесного движения пучка, а с другой — методы подавления неустойчивостей.

В ускорителях широко используются системы слабой и жесткой фокусировки для обеспечения равновесного движения частиц. В работе [1] для этой цели предлагается накладывать на пучок вынужденные колебания высокой частоты. Отмечается, что этот метод может оказаться эффективным.

Теория дает методы подавления неустойчивых когерентных типов колебаний, основанных, во-первых, на нарушении когерентности колебаний, во-вторых, на выборе соответствующих граничных условий движения пучка. На практике первый метод реализуется за счет нелинейного характера бетатронных колебаний или за счет разброса частиц по энергиям. Второй метод реализуется в результате окружения пучка соответствующей средой.

Внешняя среда может быть как пассивной, так и активной. В работе [2] теоретически показано, что при движении пучка в волноводе со стенками, имеющими индуктивный импеданс (например, волновод, нагруженный диэлектриком), подавляются продольные диссипативные неустойчивости пучка. Показывается, что подавить полностью поперечную диссипативную неустойчивость невозможно, так как система пассивна.

В работе [3] теоретически исследована возможность подавления продольной неустойчивости типа «отрицательной массы» посредством

окружения пучка проводящей спиралью. Параметры спирали могут быть выбраны такими, что неустойчивость будет подавляться в процессе всего цикла ускорения.

В работах [4, 5] теоретически и экспериментально исследовано взаимодействие сгустка с различного рода диссипативными системами: резонатором, пластинами, нагруженными волновыми сопротивлениями. Было установлено, что при соответствующем выборе волновых сопротивлений наблюдалось интенсивное затухание когерентных бетатронных колебаний. В работе [4] отмечено также, что радиальную неустойчивость удалось подавить введением обратной связи, входной сигнал которой снимался с одной из ионно-отсасывающих пластин и подавался на специальные радиально-отклоняющие пластины через усилитель. Фаза обратной связи регулировалась при помощи фазовращателя.

В других работах также отмечается эффективность применения систем с обратными связями для подавления неустойчивых когерентных колебаний центра тяжести пучка (сгустка) [6, 7]. Описанные системы состоят из дискретной сети датчиков, преобразующих устройств, исполнительных органов, а также каналов передачи информации между ними. Предложенные системы обратных связей осуществляют управление динамикой пучка по одной степени свободы (пучок рассматривается как твердое тело) и, естественно, оказываются в некоторых важных случаях неэффективными. Так, в работе [7] было отмечено, что в случае неустойчивых колебаний поперечного сечения пучка, когда отсутствуют заметные колебания центра тяжести, применение подобной системы обратной связи оказалось неэффективным. Применение системы обратной связи с сосредоточенными параметрами для обеспечения устойчивости пучка, состоящего из нескольких сгустков, оказывается неэффективным, так как увеличивается число неустойчивых типов колебаний. Возникает необходимость импульсного воздействия на различные сгустки с очень короткими импульсами и высокой скоростью повторения (соответственно  $\sim 10$  нсек и  $\sim 20$  Мгц для накопителя ADONE) [7].

Известно, то движение частиц в ускорителях в самосогласованном приближении описывается системой уравнений Власова-Максвелла, иначе говоря, пучок частиц является объектом с распределенными параметрами. В соответствии с принципом Эшби регулятор должен характеризоваться не менее сложными свойствами, т. е. для обеспечения высоког быстрого действия и разрешающей способности (селективного воздействия на возмущения) он должен быть также распределенным в пространстве. Таким образом, регулятор представляется в виде управляющей среды, которую целесообразно рассматривать как материальное дополнение к объекту, придающее ему необходимые динамические свойства, и в первую очередь, устойчивость. Управляющая среда представляется в виде окружающей пучок оболочки, совмещающей в себе функции пространственно распределенного датчика, операторного преобразователя и исполнительного органа. Точка зрения на системы управления объектами с распределенными параметрами как дополнение к объекту обоснована в работе [8].

Рассмотрим, каким образом замыкается обратная связь в системе управления динамикой пучка [8]. Как известно, в ускорителях состояния системы частиц с зарядами  $e$  в пространстве координат  $r$  и импульсов  $p$  описываются функцией распределения  $F = F(r, p, t)$ , удовлетворяющей кинетическому уравнению Власова

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (v \cdot \nabla_r)F + e\{(E + \mu_0 v_x H) \cdot \nabla_p\}F = 0. \quad (1)$$

Полное электромагнитное поле  $E, H$  в общем случае представляет собой сумму самосогласованного поля  $E_0, H_0$  от собственных токов и зарядов, стороннего поля  $E_e, H_e$ , вызванного сторонними источниками, и из поля  $E_c, H_c$ , создаваемого токами и зарядами управляющей среды:

$$E = E_0 + E_e + E_c; \quad H = H_0 + H_e + H_c. \quad (2)$$

По отношению к управляющей среде поле

$$E_1 = E_e + E_0; \quad H_1 = H_e + H_0 \quad (3)$$

является подающим, а поле  $E_c, H_c$  — отраженным.

Самосогласованное поле  $E_0, H_0$  выражается через функцию распределения посредством уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} E_0 = -\mu_0 \frac{\partial H_0}{\partial t}, \quad \operatorname{div} H_0 = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} H_0 = \varepsilon_0 \frac{dE_0}{dt} + e \int v F dp, \quad \operatorname{div} E_0 = \frac{e}{\varepsilon_0} \int F dp.$$

В присутствии управляющей среды отраженное поле  $E_c, H_c$  связано определенными операторными соотношениями с воздействующим на среду полем  $E_1, H_1$

$$\begin{aligned} E_c &= \hat{K}_E(E_1, H_1), \\ H_c &= \hat{K}_H(E_1, H_1). \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (1) — (5) замкнутая. Для выделения определенного решения необходимо использовать граничные условия, налагаемые на функцию распределения, исходя из физических соображений, а также граничные условия для электромагнитного поля.

Конкретный вид операторов  $\hat{K}_E, \hat{K}_H$  определяется в результате анализа дисперсионных уравнений, полученных из уравнений (1) — (5) для замкнутой системы пучок — управляющая среда. Так, например, в работе [10] показано, что для подавления неустойчивых когерентных поперечных колебаний пучка достаточно замкнуть на пучок по принципу обратной связи систему автоуправления с передаточной функцией, соответствующей простейшему инерционному звену, с постоянной времени, определяемой параметрами пучка, геометрией вакуумной камеры. Для подавления неустойчивых колебаний, состоящих из совокупности многих гармоник, соответственно требуется система обратной связи с постоянными времени, зависящими от волнового вектора. Это можно проследить на примере передаточной функции системы подавления двухпучковой неустойчивости в плазме, где передаточная функция соответствует совокупности двух инерционных звеньев с постоянными времени, зависящими от волнового вектора [8, 10]. Итак, в общем случае возникает необходимость управления спектром неустойчивых колебаний. Очевидно, это можно осуществить в принципе только с помощью управляющей среды, обладающей пространственно-временной дисперсией. Теория таких сред, их классификация и примеры конструктивного синтеза рассмотрены в работе [8].

В общем случае задача синтеза управляющей среды по заданному оператору является обратной задачей теории рассеяния поля, и ее решение в аналитической форме не представляется возможным.

Предлагается подойти к разрешению этого вопроса с позиций конструктивного синтеза, т. е. рассматривая такую физически (и технически) реализуемую модель управляющей среды, которая обеспечивала бы широкий класс пространственно-временных операторов обратной связи. Подобный подход развит в работе [8] для случая жидких проводников и плазмы. Показано, что анизотропия управляющей среды в заданных направлениях позволяет реализовать широкий класс пространственных операторов обратной связи. Временная дисперсия оболочки обеспечивается за счет комплексной проводимости среды.

Устройства, обладающие такими свойствами, известны в технике СВЧ, например, лампы бегущей волны (ЛБВ), распределенные параметрические усилители и др. Представляет интерес рассмотреть эти устройства с точки зрения реализации ими указанного выше класса пространственно-временных операторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев, В. А. Воробьев, С. А. Воробьев. Изв. ТПИ, **193**, (1971).
2. R. I. Briggs and V. K. Neil. I. Nucl. Energy, **C8**, 255, (1966).
3. A. M. Sessler and V. G. Vaccaro. Scient. Rept. CERN, 1968, № 1.
4. Н. С. Диканский [и др.]. «Атомная энергия», **22**, 188, (1967).
5. В. Л. Ауслендер [и др.]. «Атомная энергия», **22**, 188, (1967).
6. M. Q. Barton. Rev. Scient. Instrum., **35**, 624, (1964).
7. F. Amman. IEEE Trans. Nucl. Sci., **16**, № 3, Part I, 1073, (1969).
8. Ю. И. Самойленко. «Автоматика и телемеханика», № 2, (1968).
9. Ю. И. Самойленко. «Кибернетика», № 3, (1970).
10. Э. А. Жильков. «Атомная энергия», **22**, 497, (1967).
11. Ю. П. Ладиков-Роев. Сб. «Кибернетика и вычисл. техника». Вып. 1., Изд-во «Наукова думка», Киев, 1969.