

***В.А. Цветков***

*Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия  
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия  
e-mail: [ts.vova.01@gmail.com](mailto:ts.vova.01@gmail.com)*

Стабильность фазового движения пучка ионов является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность ускорения и качество выходного пучка. В циклотроне ДЦ-280 поддержание фазовой синхронизации представляет сложную задачу, поскольку настройка магнитной системы во многом осуществляется вручную и требует значительных временных затрат [1, 2].

В работе рассматривается подход к построению многоканальной системы автоматического управления (САУ), обеспечивающей подстройку фазового состояния пучка на основе обратной связи. Управляемыми параметрами являются токи корректирующих катушек, а измеряемыми величинами – фазовые отклонения, регистрируемые пикап-электродами.

Структурная схема предлагаемой системы управления представлена на рисунке 1. Система реализует замкнутый контур управления, в котором формируется ошибка между заданными и измеренными значениями фаз, после чего на основе этой ошибки вырабатываются управляющие воздействия на корректирующие катушки.

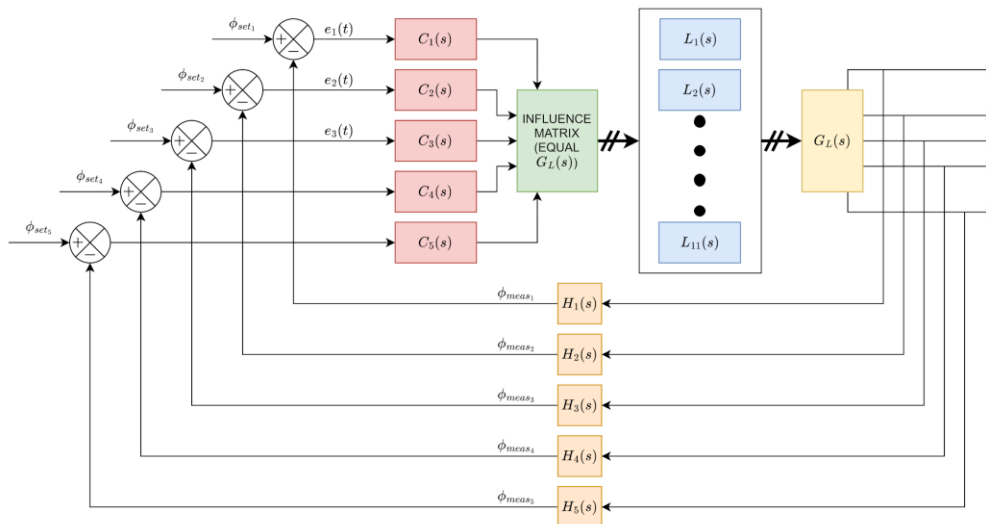


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической подстройки фазового движения пучка

Математическая модель системы представляется в виде линейной зависимости между вектором фазовых отклонений и вектором токов катушек. Данная зависимость задается матрицей отклика [1, 2], элементы которой характеризуют коэффициенты чувствительности магнитного поля к управляющим воздействиям.

Особенностью системы является наличие перекрестного влияния каналов [3]: изменение тока одной катушки приводит к изменению фазового состояния сразу в нескольких точках измерения. В связи с этим задача управления формулируется как многомерная и требует использования матричных методов.

Для вычисления управляющих воздействий используется псевдообратная матрица, позволяющая перейти от вектора ошибок к вектору токов катушек с учетом взаимосвязей между каналами и ограничений на управляющие воздействия [4].

Для проверки работоспособности предложенного подхода выполнено моделирование переходных процессов системы. Результаты показывают, что система обеспечивает сходимость фазовых координат к заданным значениям за конечное время, при этом переходные процессы носят устойчивый характер.

Практическая значимость работы заключается в возможности автоматизации процесса настройки магнитного поля ускоряющей системы, сокращении времени вывода на рабочий режим и повышении стабильности работы циклотрона.

### **Литература**

1. Wille K. The Physics of Particle Accelerators. – Oxford: Oxford University Press, 2000.
2. Zhang T., et al. Magnetic Field Measurement, Shimming and Processing for 230 MeV Superconducting Cyclotron Main Magnet / T. Zhang, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2020. – Vol. 30, No. 4. – Art. 4101205. – P. 1-5. – doi: 10.1109/TASC.2020.2977011.
3. Рейзлин В. И. Численные методы оптимизации: учебное пособие – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 – 105 с.
4. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. – New York: Springer, 2006. – 664 p.