

УДК 621.384.633.5/6

## ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА LHC

*Е. В. Горбачев, В. А. Мельников*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В коллаборации CERN–TRIUMF изготовлен и протестирован первый из импульсных магнитов канала инжекции LHC. На основе полученных характеристик и реальных параметров прототипа силовой части системы поперечной обратной связи (разработка ЛФЧ ОИЯИ) проведено математическое моделирование коррекции ошибок инжекции. Проанализированы различные режимы подавления колебаний.

The first of the pulse magnets (kicker) of the LHC injection channel is made and tested in the CERN–TRIUMF collaboration. A mathematical modeling of the injection error correction was done on the basis of the characteristics obtained and parameters of the transverse damping system power part prototype, developed at LPP, JINR. The different regimes of oscillation damping were analyzed.

### ВВЕДЕНИЕ

В ЛФЧ ОИЯИ в рамках проекта «LHC Damper» создается система поперечной обратной связи (СПОС) [1] для пучка LHC [2]. Одной из основных задач этой системы является коррекция ошибок инжекции в коллайдер. Эти ошибки определяются в основном параметрами инжекционного магнита (кикера) и системы его импульсного питания.

Ошибки инжекции могут быть разделены на две группы: статическая ошибка (влияет на отклонение центра масс инжектируемого пучка) и отклонения, возникающие вследствие неоднородности плато импульса магнитного поля (определяют спектр сигнала, поступающего на вход СПОС).

В настоящее время в коллаборации CERN–TRIUMF изготовлен и протестирован первый из импульсных магнитов канала инжекции (МКИ) [3]. Результаты этих тестов показали существенное отклонение частотно-временных параметров импульса поля инжекционного кикера от заданных в исходной спецификации СПОС [4]. Это выражается в первую очередь в том, что верхняя граница частоты неоднородности импульса составляет 12 МГц вместо 1 МГц.

В связи с этим возникла задача математического моделирования процесса подавления начальных колебаний на основе полученных данных и реальных параметров силовой части СПОС (дэмпер), определенных при исследовании прототипа системы [5].

### 1. МОДЕЛЬ И РАСЧЕТЫ

Расчетная модель была построена на основе стандартной схемы подавления поперечных колебаний. При этом не учитывались некоторые эффекты (в частности, неустойчивости), которые несущественны для первого этапа запуска LHC. Изменение фазовых

параметров пучка за оборот усреднялось по коэффициенту воздействия СПОС, что является достаточным для оценки основных параметров подавления. Эффекты типа филаментации и соответствующий рост эмиттанса также не были введены в явном виде, и соответствующие оценки производились отдельно по полученным значениям времени подавления.

Алгоритм расчета представлен на рис. 1. Для реализации программы использовалась Mathematica 4.2 WR<sup>TM</sup>. С учетом указанных выше ограничений модели и перспективы их снятия программа была построена по модульному принципу. Это обеспечивает гибкость расчета (возможность моделирования различных режимов подавления, включение реальных характеристик других устройств и процессов).

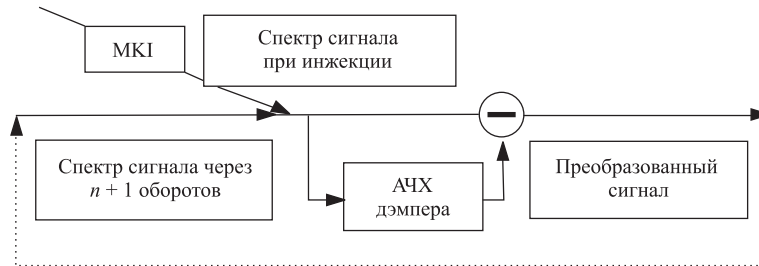


Рис. 1. Алгоритм моделирования процесса коррекции ошибок инъекции

Входной сигнал (после воздействия МКІ) был представлен в виде цифровой осциллограммы с дискретизацией 1 нс. В программе он подвергался быстрому фурье-преобразованию, после чего проводилась свертка полученного спектра с измеренной

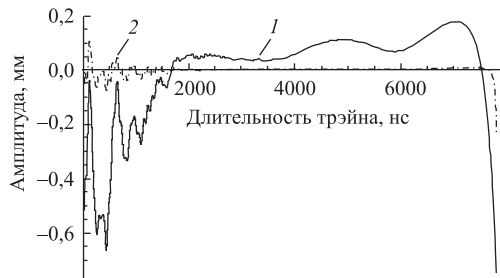


Рис. 2. Амплитуда колебаний вдоль трэйна при инъекции (кривая 1) и после подавления через 70 оборотов (кривая 2)

АЧХ демпера. Полученный спектр корректирующего сигнала вычитался из спектра исходного. Преобразованный таким образом сигнал использовался как входная информация для следующей итерации. Такой цикл повторяется заданное число раз (число оборотов). Обратное преобразование позволяет получить амплитудные характеристики пучка на каждом обороте. Результаты моделирования подавления через 70 оборотов представлены на рис. 2.

Кроме классического (пропорционального) режима подавления был также исследован нелинейный режим «bang-bang» [6].

## 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из основных показателей эффективности работы СПОС является характерное время подавления (уменьшение амплитуды колебаний). На рис. 3 представлены зависимости амплитуды колебаний от оборота в двух режимах.

Очевидно, что нелинейный режим обеспечивает существенное уменьшение времени подавления. Соответствующие значения прироста эмиттанса составляют 1,8 % для пропорционального и 1,1 % для нелинейного режимов.

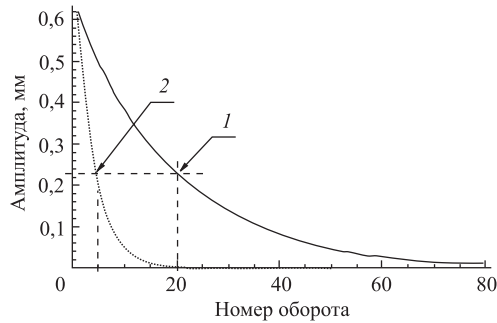


Рис. 3. Амплитуда колебаний центра масс трэйна с течением времени: 1 — характерное время подавления в пропорциональном режиме; 2 — то же в режиме «bang-bang»

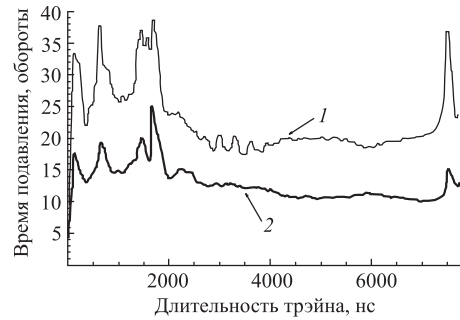


Рис. 4. Характерное время подавления вдоль трэйна: 1 — пропорциональный режим; 2 — режим «bang-bang»

Однако основная цель проведенного моделирования состояла в анализе зависимости эффективности системы от частотных свойств поступающего сигнала. Рис. 4 демонстрирует такую зависимость для обоих исследованных режимов.

Очевидно, что на переднем и заднем участках трэйна (где неоднородность воздействия кикера имеет максимальную частоту) эффективность работы системы существенно ниже (время подавления больше, чем на равномерном участке плато). Кроме того, приведенный график наглядно демонстрирует преимущества нелинейного подавления. Однако в рамках принятой модели полученные значения в любом случае удовлетворяют проектным требованиям на СПОС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное математическое моделирование процесса подавления начальных колебаний пучка ЛНС на основе полученных данных и реальных параметров силовой части СПОС показало:

- Разработанная в ЛФЧ ОИЯИ система позволяет эффективно подавлять колебания пучка с неоднородным отклонением вдоль трэйна на частотах до 12 МГц.
- Использование нелинейного режима подавления позволяет повысить эффективность системы, по крайней мере, на этапе коррекции ошибок инжекции.

Исследования будут продолжены совместно с ЦЕРН, как теоретические, так и экспериментальные (на пучке SPS).

Авторы выражают благодарность В. М. Жабицкому, Н. И. Лебеву (ОИЯИ) и коллегам из АВ RF (ЦЕРН) за полезные дискуссии и помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Linnecar T. P. R. et al.* Transverse feedback system for LHC // Proc. of PAC 2001, Chicago, USA. ТРАН004.
2. *The LHC Study Group.* The Large Hadron Collider — Conceptual Design. CERN/AC/95-05 (LHC). 1995.
3. *Ducimetière L. et al.* The LHC injection kicker magnet. CERN LHC-Project-Report-655. 2003.
4. *Boussard D., Hofle W., Linnecar T.* The electrostatic kickers and power amplifiers for the LHC transverse damping systems. Performance Specification. CERN SL-Note-99-055 (HRF). 1999.
5. *Аверьянов В. И. и др.* Прототип широкополосного усилителя мощности для системы «LHC Damper» // Тр. XVII Совещ. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000.
6. *Ivanov I. N., Melnikov V. A.* Nonlinear damping of coherent transverse oscillations of a beam in hadron cyclic accelerators and colliders // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391. P. 52–55.