

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ В СИНХРОТРОНЕ

© 2025 г. И. Ю. Николайчук^а, *, Г. С. Седых^а, В. Л. Смирнов^а, М. М. Шандов^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: nikolajchuk@jinr.ru

Поступила в редакцию 16.05.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята к публикации 28.05.2024 г.

Для решения актуальных задач в области физики частиц и прикладных исследований создаются ускорительные комплексы на базе синхротронов, включающие каскадную инжекционную цепочку ускорителей. В ее состав входят источники ионов, инжекторы, бустеры и основные кольцевые ускорители, а также каналы перевода и транспортировки пучка. Эффективная работа синхротронного ускорителя предполагает проведение комплекса работ по коррекции замкнутой орбиты пучка. Для этих целей разрабатывается программное обеспечение, позволяющее автоматизировать проводимые процедуры коррекции. В статье описаны поставленные задачи и способы их решения на этапе разработки программного обеспечения системы коррекции замкнутой орбиты пучка в кольцевых ускорителях и накопителях частиц на примере бустерного синхротрона комплекса NICA. Методы и алгоритмы, использованные при создании программного комплекса, адаптированы таким образом, чтобы программы могли применяться без значительных доработок на различных ускорителях частиц.

Ключевые слова: Синхротрон, коррекция орбиты, программное обеспечение, NICA

DOI: 10.56304/S207956292406023X

ВВЕДЕНИЕ

Коррекция положения замкнутой орбиты пучка в синхротроне является одной из первоочередных задач для получения устойчивой циркуляции и проектных параметров пучка. На этапе разработки магнитооптической структуры любого создаваемого кольцевого ускорителя закладываются аппаратные средства измерения и коррекции положения орбиты. Система коррекции орбиты синхротронов представляет собой набор дипольных корректирующих магнитов (корректоров). Диагностика положения орбиты производится мониторами положения пучка (МПП).

Алгоритмически задачей коррекции орбиты является вычисление токов питания корректоров, минимизирующих отклонения текущего положения пучка от идеального (как правило, соответствующего центру апертур структурных элементов). Для этого используются специализированные аналитические методы, использующие расчетные данные из виртуальных моделей установки и результаты измерений с пучком. На основе разработанных алгоритмов создается программное обеспечение (ПО), задачей которого является автоматизированная коррекция орбиты и поддержание положения орбиты в требуемых пределах.

Комплекс NICA включает в себя три сверхпроводящие установки кольцевого типа — два быст-

роциклирующих синхротрона и коллайдер (см. рис. 1). Универсальность программного обеспечения позволяет производить коррекцию орбиты в каждой установке, используя один программный комплекс. Реализуются различные способы коррекции орбиты, направленные на решение широкого круга экспериментальных задач.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Универсализация ПО коррекции орбиты для применения на различных синхротронах требует, в первую очередь, разработки ПО низкого уровня, выполняющего роль буфера между аппаратными средствами (интерфейсами управления источниками питания корректоров и электроники сбора данных с МПП) и клиентским ПО высокого уровня. Объектно-ориентированная система Tango Controls [1], на базе которой создана система управления установками комплекса NICA [2], позволяет обеспечить взаимодействие между различными устройствами, системами и программами. В рамках системы коррекции орбиты для каждого корректора и МПП создается программное устройство в системе управления с унифицированными параметрами и функциями. ПО высокого уровня взаимодействует с Tango-устройством. Та-

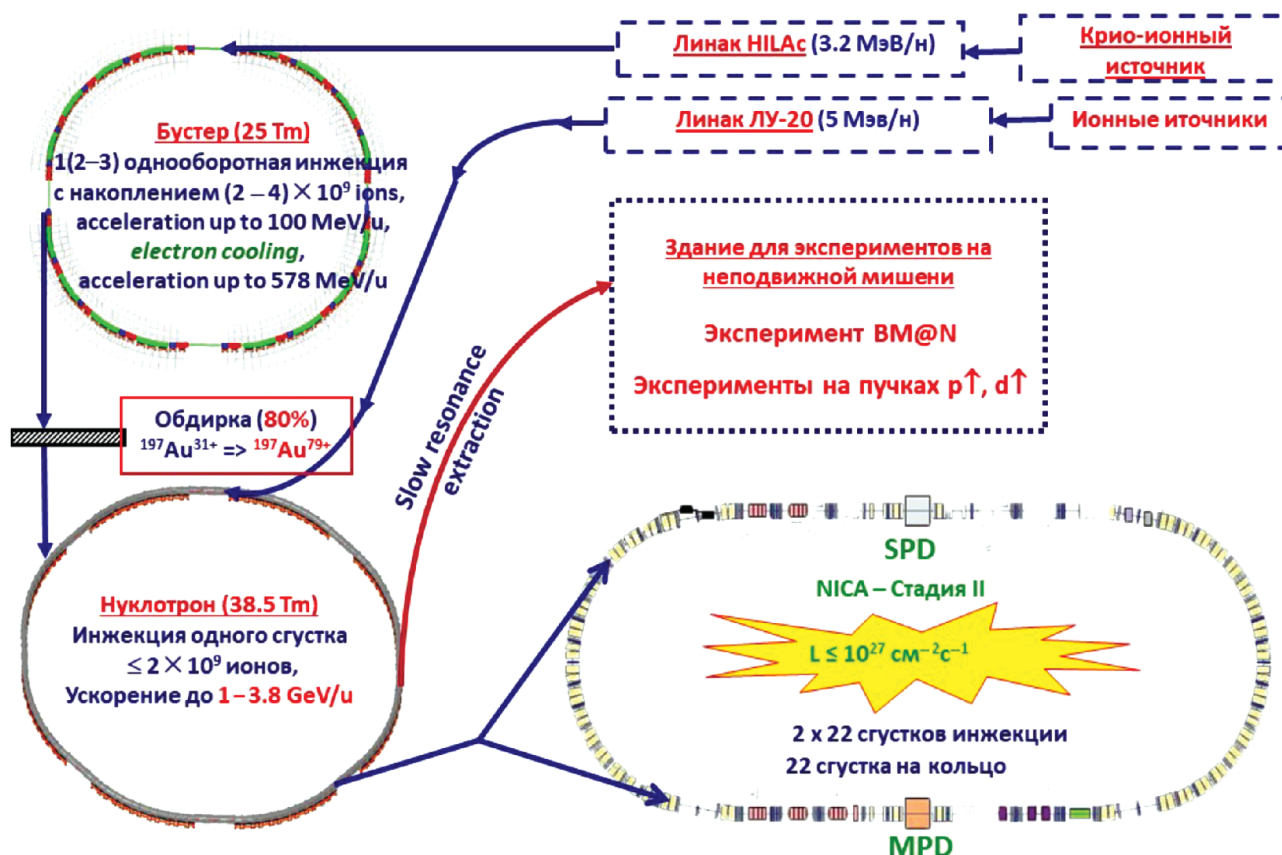


Рис. 1. Схема комплекса NICA.

ким образом, клиентское ПО с реализованными алгоритмами можно использовать для коррекции орбиты любой установки, система управления которой основана на Tango Controls и включает описанные программные устройства.

Переключение между ускорителями производится выбором соответствующего конфигурационного файла с описанием системных параметров устройств диагностики и коррекции. ПО коррекции орбиты, разработанное для инжекционного комплекса коллайдера NICA, использует конфигурационные файлы в формате JSON [3], в которых содержатся соответствующие системные параметры программных устройств корректоров и МПП в системе управления и параметры для алгоритмов коррекции.

ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ

Определение оптимальной (“золотой”) орбиты является одной из первых задач в рамках коррекции. Положение пучка на каждом МПП, соответствующее “золотой” орбите, может быть измерено в автоматическом режиме по следующему

алгоритму. В месте расположения МПП создается локальное отклонение (бамп) орбиты. Постепенное увеличение амплитуды бампа приводит, в итоге, к снижению интенсивности циркулирующего пучка вследствие достижения границ геометрической апертуры вакуумной камеры и “гибели” частиц на ней. Полный поперечный “проход” пучком внутри вакуумной камеры от одной ее границы до противоположной в месте расположения каждого из МПП позволяет определить положение центра масс пучка на рассматриваемом участке, соответствующее максимальной интенсивности пучка. Совокупность найденных таким образом координат положения центра масс пучка на каждом из МПП и формирует “золотую” орбиту [4]. Для удобства работы оператора реализуется функция отображения текущей орбиты относительно “золотой”. При этом все алгоритмы коррекции минимизируют отклонения между обозначенными орбитами.

Для оптимизации инжекции и вывода пучка на соответствующих участках кольца ускорителя также может возникать необходимость создания

соответствующих локальных бампов орбиты. Вариация амплитуды бампа производится одновременным изменением силы нескольких корректоров в соответствии с расчетными коэффициентами связи между ними. Оператор имеет возможность изменять амплитуду локального бампа одним элементом управления.

Глобальная (по всему периметру ускорителя) коррекция орбиты требует задействования специализированных алгоритмов. В ПО коррекции орбиты комплекса NICA основным алгоритмом является метод наименьших квадратов с использованием матричного подхода. Силы корректоров вычисляются с использованием обратной матрицы отклика орбиты, вычисляемой при помощи метода сингулярного разложения [5]. Еще одним алгоритмом глобальной коррекции орбиты является метод локальных бампов. Данный итерационный алгоритм заключается в последовательном создании бампов орбиты по всему периметру установки. После одного “прохождения” кольца рассчитывается скорректированная орбита, получаемая при подобранном наборе сил корректоров. В случае, если возмущения скорректированной орбиты превышают допустимые, “проход” кольца повторяется еще раз. Таким образом, по результатам расчетов за несколько “проходов” возмущения орбиты могут быть подавлены до ± 1 мм. Однако при выходе из строя корректоров эффективность данного способа снижается.

Вышеописанные алгоритмы позволяют производить коррекцию орбиты при фиксированной энергии пучка. Для поддержания скорректированной орбиты при ускорении требуется применения метода динамической коррекции. В случае отсутствия рассогласования частоты ускоряющего ВЧ напряжения с ведущим магнитным полем динамическая коррекция может быть реализована масштабированием сил корректоров пропорционально ведущему полю. Данный метод динамической коррекции орбиты был успешно применен в пуско-наладочном сеансе с пучком Бустера инжекционного комплекса коллайдера NICA [4].

Величина рассогласования между частотой ВЧ и ведущим полем, которое может присутствовать на этапах пуско-наладочных работ, может быть определена из текущей орбиты. Для этого необходимо вычесть из измеренной орбиты дисперсионную составляющую. При данном вычитании определяется такое значение импульсного разброса, при котором стандартное отклонение показаний МПП будет минимальным. Вычисленное импульсное отклонение иона может быть пересчитано в рассогласование частоты ускоряющей системы от требуемого значения.

Ускорители частиц включают различные устройства формирования пучка, влияющие на орбиту ионов. В Бустере комплекса NICA одними из таких устройств являются корректирующие магниты системы электронного охлаждения [6]. Они предназначены для коррекции положения электронного пучка при настройке соосности электронного и ионного пучков. Локальная коррекция положения ионного пучка в секции охлаждения ведет к искажению орбиты ионного пучка во всем кольце. Для подавления данных возмущений орбиты ионного пучка реализован алгоритм автоматической компенсации влияния корректоров системы электронного охлаждения. Он заключается в создании линейной связи между силами корректоров системы электронного охлаждения и корректоров Бустера, расположенных до и после секции охлаждения.

После определения оптимальной “золотой” орбиты и минимизации текущих возмущений до требуемых значений необходимо поддерживать орбиту скорректированной длительное время. Для этого реализован алгоритм автоматического длительного поддержания орбиты. Результаты измерений положения пучка накапливаются за несколько сотен циклов ускорения. Затем записанные показания усредняются для каждого МПП и определяется средняя орбита по всем циклам. Если полученная средняя орбита отличается от “золотой” на величину больше, чем заданная пользователем, производится перерасчет сил корректоров и коррекция текущей орбиты.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ КОМПЛЕКСА NICA

Взаимодействие ПО коррекции орбиты с системой управления ускорителем происходит с использованием событийного механизма. По завершении цикла ускорения генерируется событие, по которому происходит считывание данных с МПП и корректоров. Во избежание “зависания” интерфейса пользователя чтение данных происходит в отдельном потоке.

Разработанные алгоритмы коррекции являются итерационными. Выполнение расчетов токов корректоров и формирования импульса производится в отдельном потоке и занимает время, сравнимое с длительностью цикла ускорения (4–5 с). Таким образом, с учетом времени установки новых значений токов в источниках питания, коррекция орбиты производится лишь спустя несколько циклов ускорения. Однако требование на долговременную стабильность орбиты позволяет пренебречь данными задержками.

Корректирующие магниты синхротронов комплекса NICA являются сверхпроводящими. Такая нагрузка для источника питания является специфической, в связи с чем при слишком быстром изменении тока могут возникать нежелательные всплески тока. Особенно часто такие эффекты возникают на участках перехода от постоянного значения тока к росту. Для снижения данных негативных явлений данные участки заменяются параболой.

В сеансах пуско-наладочных работ с пучком на инжекционном комплексе NICA было замечено, что при малых токах (0.1–0.3 А) на выходе источников питания корректоров возникает автоколебательный процесс. В связи с этим в алгоритмы коррекции было добавлено ограничение на минимальный ток корректора. Кроме того, при задании импульса тока в промежутке между циклами ускорения ток в корректоре остается постоянным и равным значению при энергии инжекции.

При достаточном согласовании частоты ускоряющего ВЧ напряжения динамическую коррекцию орбиты достаточно производить масштабированием токов корректоров пропорционально ведущему магнитному полю. Алгоритм динамической пропорциональной коррекции следующий. Производится статическая коррекция орбиты на энергии инжекции и определяется значение тока для каждого корректора. После этого для каждого корректора вычисляется зависимость тока от времени во всем цикле ускорения. Для этого форма импульса ведущего магнитного поля нормируется на значение поля при энергии инжекции, вычисляются области постоянного магнитного поля (“столы”) и их величины. Затем нормированный импульс умножается на ток корректора при энергии инжекции. Полученные импульсы тока устанавливаются для каждого корректора.

Использование конфигурационных файлов позволяет использовать одно программное обеспечение коррекции орбиты для управления несколькими ускорителями. При выборе одной из возможных установок или переключении между ними в программу автоматически загружаются соответствующие данные, записанные в конфигурационном файле. Название файла должно содержать название установки, таким образом программа определяет соответствующий файл. Файл содержит в себе адреса и имена всех устройств системы коррекции (корректоров и МПП) в системе Tango. Кроме того, в файле может быть указана сервисная информация, такая как азимутальное положение устройства в кольце ускорителя и пр. Для алгоритмов коррекции создаются дополнительные конфигурационные файлы, содержащие переменные, доступные для изменения квалифицированному пользователю. К таким данным от-

носятся максимальный и минимальный токи в корректорах, структурные функции ускорителя в зависимости от энергии и др.

Программное обеспечение коррекции орбиты будет использоваться при проведении сеансов с пучком операторами ускорительного комплекса. Для снижения нагрузки на оператора весь функционал должен быть максимально автоматизирован, а интерфейс пользователя должен быть максимально понятен. В идеальном случае, весь функционал ПО, доступный оператору, должен сводиться к автоматической коррекции орбиты к заранее определенной “золотой” орбите, включении автоматизированного поддержания скорректированной орбиты и отображении текущих статусов корректоров, МПП и положения орбиты. Для продвинутых пользователей при необходимости разрабатывается дополнительный функционал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы и ПО коррекции замкнутой орбиты потенциально могут быть применены к большинству ускорителей синхротронного типа. Программное обеспечение позволяет быстро переключаться между установками и производить настройку системы коррекции. Автоматизация процесса коррекции и возможность длительного поддержания скорректированной орбиты позволяют снизить нагрузку на оператора ускорительного комплекса и повысить производительность, что особенно актуально при работе крупных установок и комплексов.

Часть из разработанных алгоритмов успешно применена в пуско-наладочных сеансах с пучком инжекционного комплекса NICA. Новые алгоритмы опробованы на эмуляторах устройств системы коррекции и планируются к применению в ближайших сеансах с пучком ускорительного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. <http://www.tango-controls.org/>.
2. Andreev V.A. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 574.
<https://doi.org/10.1134/s1547477120040020>
3. Introduction to JSON. <https://www.json.org/json-ru.html>.
4. Nikolaichuk I.Yu. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2025. V. 67. P. 865.
<https://doi.org/10.1134/S0020441224701628>
5. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. 2nd Ed. 1992. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
6. Bryzgunov M. et al. // Proc. 12th Workshop Beam Cooling and Related Topics (COOL-2019). Sept. 23–27, 2019. Novosibirsk, Russia. 2019. P. 22–25.

Features of Synchrotron Beam Orbit Correction Software

I. Yu. Nikolaichuk¹, *, G. S. Sedykh¹, V. L. Smirnov¹, and M. M. Shandov¹

¹ *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

**e-mail: nikolajchuk@jinr.ru*

Received May 16, 2024; revised May 16, 2024; accepted May 28, 2024

Abstract—Accelerator complexes with chain of accelerators have been created in recent years for solving relevant problems of particle physics and application research. These chains consist of accelerators for intermediate energies, the main accelerator for project beam parameters, experimental stations, and beam transfer channels. Operation with a synchrotron accelerator requires the correction of a closed beam orbit. Automatic software is developed for this purpose. The main features of software development for beam orbit correction in ring accelerators and colliders are described for the NICA complex booster synchrotron as an example. Multipurpose methods have been used for general application in beam orbit correction systems.

Keywords: synchrotron, beam orbit correction, software, NICA