

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СИНХРОТРОНАХ И КАНАЛАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ

*В. В. Алцыбеев^а, О. С. Козлов^б, В. А. Козынченко^а, В. А. Михайлов^б,
Д. А. Овсянников^а, А. О. Сидорин^{а, б, 1}, А. В. Тузиков^б, Г. В. Трубников^{а, б}*

^а Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматривается программный комплекс, предназначенный для моделирования и анализа поперечной динамики пучков заряженных частиц в синхротронах и каналах транспортировки. Программный комплекс позволяет проводить расчет поперечной динамики пучка заряженных частиц в синхротронах и каналах транспортировки на основе линейной модели, расчет структурных функций синхротронов и каналов транспортировки, акцептанса и эмиттанса пучка, коррекцию орбиты. Реализованы расчет распределений качества коррекции орбиты, восстановление параметров транспортных матриц по матрицам отклика.

We consider a code developed for modeling and analyzing the transverse dynamics of charged particle beams in synchrotrons and transport channels. The code provides the calculation of transverse dynamics of the charged particle beam in synchrotrons and transport channels based on the linear model, as well as the calculation of the structural functions of synchrotrons and transport channels, the beam acceptance and emittance, orbit correction. It is possible to calculate the distributions of the orbital correction quality, restoring the parameters of transport matrices according to the response matrices.

PACS: 02.60.Cb; 29.20.Lq

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Объединенном институте ядерных исследований реализуется проект создания коллайдера протонов и тяжелых ионов NICA. Назначение создаваемого ускорительного комплекса предполагает достаточно жесткие требования к характеристикам встречных пучков. Достижение таких характеристик пучков представляет собой серьезную проблему, которая обусловлена погрешностями магнитного поля в поворотных магнитах и квадрупольных линзах, а также погрешностями юстировки магнитных элементов ускорительного комплекса. Для решения этих проблем создается программный комплекс моделирования, анализа и оптимизации динамики пучков заряженных частиц

¹E-mail: sidorin@jinr.ru

в синхротронах и каналах транспортировки пучков, основанный на проекте с открытым исходным кодом DAISI (Design of Accelerators, optimizations and Simulations) [1, 2]. Основным назначением создаваемого программного комплекса является обеспечение решения задач по моделированию и оптимизации пучков в ускорительном комплексе, коррекции орбиты в синхротронах, восстановлению погрешностей магнитного поля и погрешностей юстировки магнитных элементов ускорительного комплекса.

В настоящее время в мире создан ряд аналогичных комплексов, реализующих различные модели динамики пучков в синхротронах и методы коррекции орбиты. Прежде всего, следует отметить такие продукты, как MADX (CERN) [3] и OptiMX (FNAL) [4]. Основное отличие назначения комплекса от приведенных выше заключается в его направленности на решение задач восстановления погрешностей магнитных полей и погрешностей юстировки магнитных элементов, а также оптимизации динамики пучков в синхротронах и каналах транспортировки. Комплекс программ имеет дружественный графический интерфейс пользователя и различные наборы инструментов, методов и алгоритмов расчета динамики пучков, коррекции орбиты, восстановления параметров ускорительных комплексов. Рассматриваемый программный комплекс применялся для решения задачи оценки качества системы коррекции в создаваемом бустере нуклотрона и в настоящее время совершенствуется для решения различных задач в рамках проекта NICA.

1. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Комплекс программ состоит из программной оболочки и набора программных модулей и библиотек функций и предназначен для моделирования и оптимизации динамики пучков заряженных частиц в синхротронах, коррекции замкнутой орбиты в синхротроне и восстановления конструктивных параметров синхротронов по матрице отклика. Программный комплекс реализован на языке C++ с использованием инструментария Qt. Программная оболочка обеспечивает взаимодействие пользователя с программным комплексом, в том числе выполнение по команде пользователя отдельных функций, ввод и сохранение параметров, загрузку из файла и запись в файл параметров и результатов расчетов, а также их визуализацию. Также программная оболочка обеспечивает возможность запуска из нее программы MADX, прием данных из этой программы и их отображение. Форматы входных и выходных данных согласованы с соответствующими форматами программы MADX. Графический интерфейс пользователя изображен на рис. 1.

Параметры оптики синхротрона загружаются в файлах формата MADX, параметры пучка вводятся пользователем в интерактивном режиме. Все результаты моделирования и параметры рассчитываемой структуры могут быть сохранены в файлах. Предусмотрена возможность задания параметров сохранения и отображения результатов моделирования, например количества сохраняемых траекторий. Ранее сохраненные результаты моделирования могут быть загружены и представлены в рабочей области, в том числе в графическом виде. Для обеспечения анализа результатов моделирования возможно отображение нескольких графиков в рабочей области (рис. 2). Для удобства анализа результатов расчетов масштаб графиков может быть увеличен или уменьшен с помощью мыши. При нажатии на правую кнопку мыши на графиках появляются всплывающие комментарии. Под графиками расположена цветовая легенда.

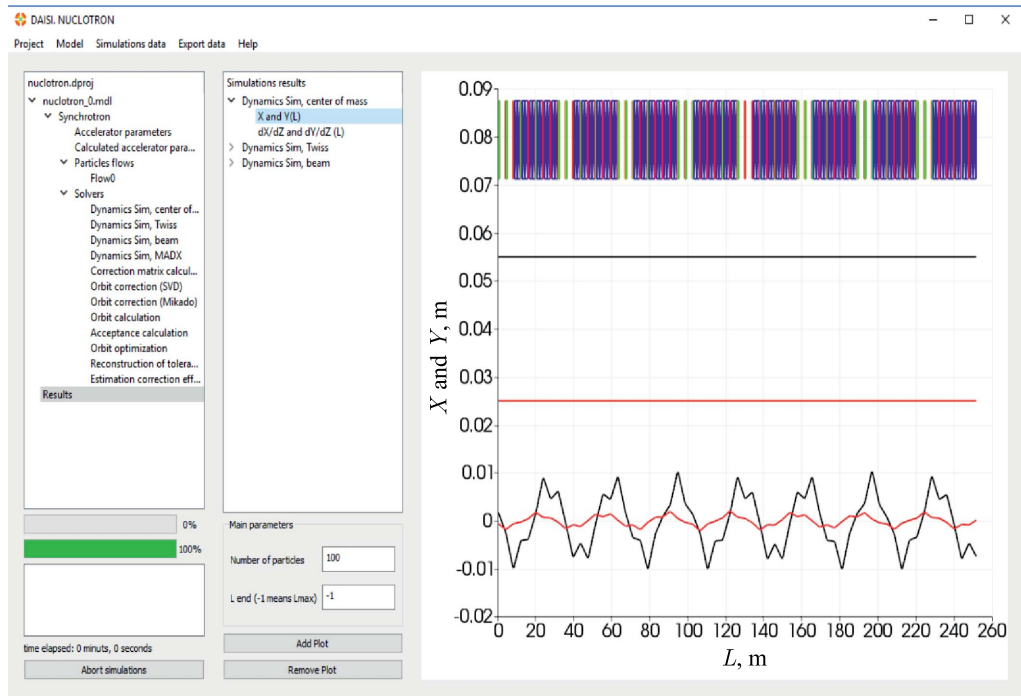


Рис. 1. Графический интерфейс пользователя

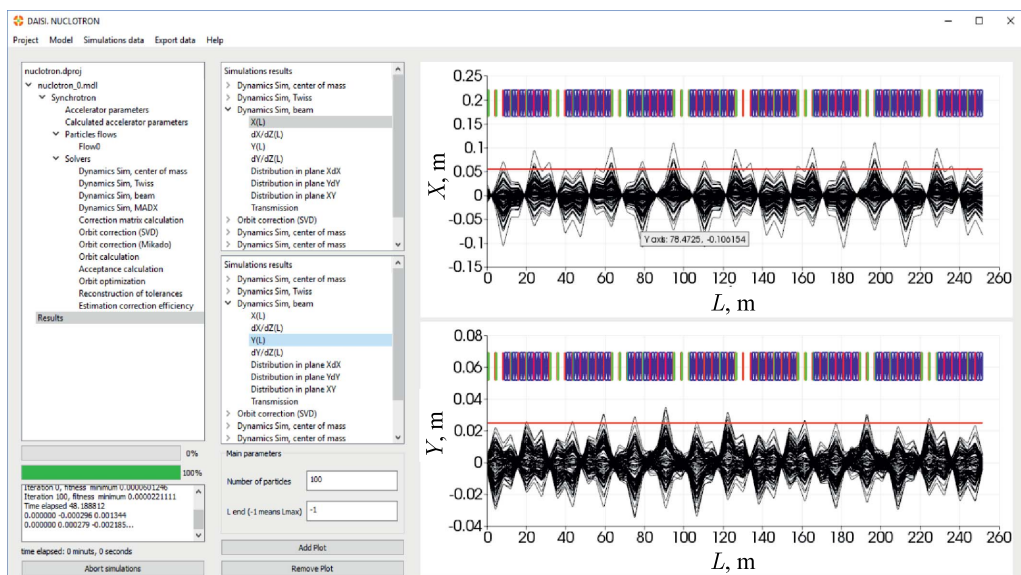


Рис. 2. Отображение результатов расчета в графической области

Также реализована возможность выполнения расчета структурных функций синхротронов и динамики пучка с использованием программы MADX. В рамках этого этапа по введенным в интерактивном режиме параметрам пучка и путям файлов оптики синхротрона автоматически формируются служебные инициализирующие файлы MADX и осуществляется ее запуск. В указанные пользователям файлы записываются результаты расчетов, которые могут быть представлены в графическом виде.

2. ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

2.1. Расчет поперечной динамики пучка в синхротронах и каналах транспортировки на основе линейной модели. В комплексе программ реализована компьютерная модель расчета поперечной динамики пучка в синхротронах и каналах транспортировки на основе линейной модели с использованием транспортных матриц структурных элементов ускоряющих комплексов, таких как дипольные поворотные магниты, квадрупольные линзы и дипольные магнитные корректоры. Предусмотрена возможность добавления других магнитных элементов, а также изменение расположения пикап-мониторов и дипольных корректоров. Для каждого магнитного элемента могут быть заданы погрешности юстировки (смещения магнитного элемента вдоль каждой из трех декартовых осей и повороты вокруг каждой из трех декартовых осей). В настоящее время дорабатывается возможность учета погрешностей магнитного поля для каждого магнитного элемента. При расчете динамики пучок представляется набором модельных частиц, собственное поле пучка не учитывается. Начальное распределение формируется с использованием библиотеки функций начальных распределений. Предусмотрена возможность расчета эмиттанса пучка и аксептанса ускоряющей структуры. Совместно с расчетом динамики пучка заряженных частиц реализована возможность расчета динамики центра тяжести пучка. Расчет динамики центра тяжести пучка может осуществляться как на основе аналитических представлений для линейной динамики центра тяжести пучка, имеющего заданное начальное распределение, так и с использованием данных расчета динамики пучков.

2.2. Расчет огибающей пучка и структурных функций синхротронов и каналов транспортировки. В отдельном модуле реализован расчет динамики пучка в параметризации Твисса. Имеется возможность расчета структурных функций синхротронов и каналов транспортировки как на основе аналитических представлений для линейной динамики пучка, так и с использованием данных расчета динамики пучков.

2.3. Расчет орбиты синхротронов. При расчете поперечной динамики центра тяжести пучка вычисляются поперечные отклонения центра тяжести пучка от оси ускоряющей структуры в начале и конце каждого магнитного элемента. Помимо этого реализована возможность вычисления поперечных отклонений от оси ускоряющей структуры в любой точке внутри магнитных элементов. Также реализована возможность вычисления поперечных отклонений центра тяжести пучка от оси ускоряющей структуры с использованием данных об измерениях орбиты на пикап-мониторах. Таким образом, орбита рассчитывается по всему кольцу синхротрона, в том числе внутри его структурных элементов. Предусмотрена возможность при расчете орбиты исключать показания некоторых пикап-мониторов. Реализован аналитический метод определения замкнутой орбиты в синхротроне. В настоящее время реализуется возможность нахождения замкнутой орбиты с использованием оптимизационных методов.

2.4. Задание начальных распределений пучков. Для решения таких задач, как расчет динамики пучков, расчет структурных функций, вычисление матриц отклика, а также различных оптимизационных задач, реализована возможность задания различных начальных распределений пучка. В настоящее время реализованы равномерное и нормальное начальные распределения пучка, которые формируются на основе задания входного эмиттанта.

2.5. Расчет матриц отклика. По заданным начальному распределению пучка и конфигурации расположения пикап-мониторов и дипольных корректоров рассчитывается матрица отклика. Матрицы отклика сохраняются в отдельных файлах и могут быть использованы для решения задачи коррекции орбиты в синхротроне и задач по восстановлению погрешностей магнитных полей и погрешностей юстировки магнитных элементов синхротронов и каналов транспортировки.

2.6. Коррекция орбиты в синхротронах. В комплексе программ реализована возможность коррекции орбиты в синхротронах с использованием библиотеки методов коррекции. Коррекция орбиты производится на основе матрицы отклика. Матрица отклика может быть рассчитана с использованием результатов численного моделирования динамики центра тяжести пучка или получена по результатам измерения положения центра тяжести пучка на пикап-мониторах синхротрона. Библиотека методов коррекции орбиты содержит различные алгоритмы коррекции орбиты с использованием матрицы отклика: SVD и MICADO. Метод SVD предусматривает возможность определения токов в корректорах на основе использования псевдообратной матрицы для матрицы отклика. Псевдообратная матрица рассчитывается с использованием сингулярного разложения матрицы отклика. Метод MICADO позволяет определять наиболее эффективные корректоры из числа имеющихся. В настоящее время ведется работа по реализации оптимизационных методов коррекции орбиты.

2.7. Оценка эффективности коррекции орбиты в синхротронах. В комплексе программ имеется модуль для решения задачи оценки качества системы коррекции в синхротронах. Этот модуль обеспечивает проведение вычислительного эксперимента, в ходе которого рассчитывается орбита для большого количества версий канала ускорителя с погрешностями, произвольно заданными в установленном диапазоне. Для каждой версии канала ускорителя вычисляется максимальное отклонение орбиты в обеих поперечных плоскостях. Затем осуществляется коррекция орбиты для каждой версии канала ускорителя, а также вычисляются максимальные отклонения орбиты. Проведенный вычислительный эксперимент для большого количества версий канала ускоряющей структуры с погрешностями позволяет оценить качество системы коррекции орбиты.

2.8. Восстановление погрешностей юстировки магнитных элементов в каналах транспортировки. Одной из основных задач комплекса программ является обеспечение возможности восстановления погрешностей юстировки магнитных элементов синхротронов и каналов транспортировки по измеренным матрицам отклика. В настоящее время реализован модуль восстановления погрешностей юстировки магнитных элементов каналов транспортировки по рассчитанным матрицам отклика. Матрицы отклика вычисляются на основе результатов моделирования динамики пучка в структуре с заданными погрешностями. Для восстановления погрешностей юстировки используются генетические алгоритмы, метод роя частиц, метод имитации отжига. Проводится работа по добавлению в библиотеку методов оптимизации других оптимизационных методов и распространению возможности восстановления погрешностей юстировки на синхротроны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен программный комплекс моделирования, анализа и оптимизации динамики пучков заряженных частиц в синхротронах и каналах транспортировки пучков. В настоящее время проводятся работы по совершенствованию данного программного продукта и его использованию для различных задач в рамках проекта создания коллайдера NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Altsybeyev V. V.* Configurable Code for Beam Dynamics Simulations in Electrostatic Approximation // Proc. of 2016 Young Researchers in Vacuum Micro/Nano Electronics (VMNE-YR 2016).
2. DAISI. Design of Accelerators, Optimizations and Simulations. <https://daisi.sourceforge.io>.
3. MAD — Methodical Accelerator Design. CERN-BE/ABP Accelerator Beam Physics Group. <http://madx.web.cern.ch/madx/>.
4. OptiM — A Program for Accelerator Optics. FNAL. <http://home.fnal.gov/~ostiguy/OptiM/>.