

ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ЦИКЛОТРОНА

*Г. А. Карамышева^{a, 1}, С. В. Гурский^a, О. В. Карамышев^a,
Д. В. Попов^a, В. А. Малинин^a, И. Д. Ляпин^a, А. А. Сеница^a*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Виртуальное прототипирование (ВП) — метод проектирования, основанный на технологиях автоматизированного проектирования (САПР). Виртуальное прототипирование предполагает работу с прототипом всего изделия на всех этапах разработки, от ранних стадий до завершения. Для внедрения метода виртуального прототипирования в практику разработки циклотронов мы создали платформу на базе Matlab, которая объединяет распределенные компоненты ВП и обеспечивает механизм их взаимодействия. Основные компоненты программного обеспечения, используемого для разработки циклотронов, включают САПР (Solidworks), различные модули CST Studio, а также программы анализа и трассировки, которые были разработаны ранее в Matlab, а теперь оптимизированы и адаптированы под новые задачи.

Virtual prototyping (VP) is a design method based on computer-aided design (CAD) technologies. Virtual prototyping involves working with a prototype of the entire product at all stages of development, from the early stages to completion. To implement the virtual prototyping method in the cyclotron development process, we created a Matlab-based platform that integrates distributed VP components and provides a mechanism for their interaction. The main software components used in cyclotron development include CAD (Solidworks), various CST Studio modules, as well as analysis and tracing programs that were previously developed in Matlab and are now optimized and adapted for new tasks.

PACS: 29.20.dg; 84.30.Bv

ВВЕДЕНИЕ

Виртуальное прототипирование — это современный метод проектирования, который предполагает создание цифровых моделей продуктов или систем для их анализа, тестирования и оптимизации начиная с самого раннего этапа разработки. Этот подход позволяет инженерам и разработчикам проводить всесторонние испытания и симуляции различных характеристик изделия, таких как механические свойства, электромагнитные взаимодействия и другие параметры, без необходимости создания физического прототипа. Виртуальное прототипирование активно используется в таких отраслях, как автомобилестроение, авиакосмическая промышленность, электроника и строительство — там, где необходимы точные расчеты и проверка надежности изделия до выхода на рынок.

¹E-mail: gkaram@jinr.ru

Основные преимущества виртуального прототипирования:

- Снижение затрат и времени: виртуальное прототипирование позволяет значительно экономить ресурсы, поскольку изменения вносятся напрямую в цифровую модель. Это минимизирует необходимость создания большого числа физических прототипов, сокращая расходы и время на разработку.
- Оптимизация дизайна: с помощью моделирования можно обнаружить и исправить возможные ошибки проектирования на ранних этапах. Это улучшает качество конечного продукта и ускоряет процесс поиска оптимальных решений.

ПЛАТФОРМА Matlab ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЦИКЛОТРОНА

Виртуальное прототипирование оказывает значительное влияние на такую узкоспециализированную область, как проектирование циклотронов (рис. 1). Для эффективного внедрения ВП нами была разработана интегрированная платформа на базе Matlab [1], которая объединяет различные распределенные компоненты и обеспечивает их слаженное взаимодействие. Matlab играет ключевую роль в обеспечении связи между основными программными инструментами, применяемыми в проектировании циклотронов. К ним относятся САПР (например, Solidworks) [2], модули CST Studio [3], а также специализированные программы для анализа карт электромагнитного поля и трассировки пучка, разработанные авторами в Matlab.

Непосредственно в Matlab выбираются основные параметры будущего циклотрона, в том числе такие, как форма секторов магнита и ускоряющих резонаторов. Затем на основе выбранных данных создается параметризованная модель циклотрона в САПР (Solidworks). Отдельные системы циклотрона отправляются в CST Studio для расчета и тестирования в соответствующих модулях. Результаты расчетов из CST импортируются обратно в Matlab, где обрабатываются и анализируются с помощью программы

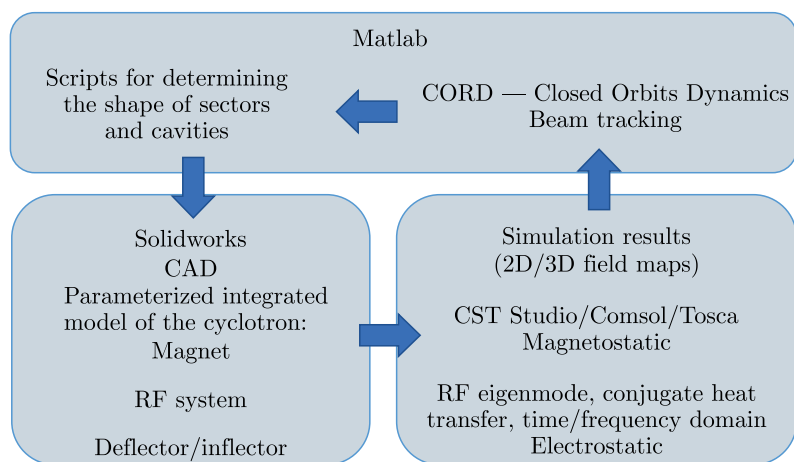


Рис. 1. Схема платформы виртуального прототипирования циклотрона

CORD (Closed ORbit Dynamics) [4]. Центральная область ускорителя и система вывода пучка тестируются с помощью программ трассировки пучка.

Основы методики виртуального прототипирования циклотрона были разработаны нами в процессе проектирования сверхпроводящего циклотрона SC200 (ASIPP, Китай) [5, 6], запуск которого состоялся в 2020 г. Методика была усовершенствована при работе над циклотроном MSC230 (Дубна) [6], предназначенным для исследований методов протонной терапии в Инновационном центре ОИЯИ.

Внедрение виртуального прототипирования в проектирование циклотронов существенно повышает эффективность проектирования, обеспечивает комплексный подход и способствует созданию более сложных и качественных как отдельных систем циклотрона, так и ускорителя в целом.

РАБОТА В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Принципы работы в системах автоматизированного проектирования при создании сборок и частей могут различаться в зависимости от конкретного программного обеспечения, но в целом процесс можно описать двумя основными подходами: *от сборки к частям* (top-down) и *от частей к сборке* (bottom-up). Эти методы имеют свои особенности и применяются в разных ситуациях.

Подход от частей к сборке (Bottom-Up Design).

1. Создание отдельных частей: в этом подходе каждый компонент системы проектируется как отдельная деталь. Детали создаются в отдельных файлах, в которых задаются их параметры, размеры, геометрия и функциональные элементы (например, отверстия, выступы, поверхности для соединений).

2. Объединение в сборку: когда все необходимые компоненты спроектированы, они собираются в единый файл сборки. В сборке каждая часть вставляется и позиционируется с использованием различных зависимостей или сопряжений (constraints), таких как соосность, совпадение плоскостей, совпадение границ и т. д.

3. Моделирование работы сборки: после создания сборки можно проводить анализ, проверять ее работу, смотреть на взаимодействие частей, выполнять симуляции.

Подход от сборки к частям (Top-Down Design).

1. Создание общей сборки: в этом методе сначала создается сборка на более высоком уровне, в которой задаются ключевые компоненты системы и их взаимодействие. Основная идея заключается в том, что общая структура сборки задает требования к деталям.

2. Проектирование на уровне сборки: чаще всего основные геометрические параметры и элементы (например, размеры, расположение отверстий и сопряжений) создаются в самой сборке, а затем эти параметры используются для проектирования деталей. Это позволяет автоматически связывать геометрию между частями.

3. Создание деталей в контексте сборки: детали проектируются непосредственно внутри сборки с учетом взаимного положения и взаимодействия с другими частями. Это обеспечивает их точную подгонку к остальным элементам конструкции. Например, если одна деталь должна быть вставлена в другую, габариты первой детали могут быть автоматически настроены в зависимости от размеров второй.

4. Редактирование и изменение сборки: при необходимости изменения в сборке могут автоматически вносить корректировки в отдельные детали, поскольку их параметры связаны с общей структурой. Это делает процесс более гибким и позволяет вносить изменения на уровне всей системы.

Сравнение двух подходов.

- **Bottom-Up** более интуитивен, когда работа ведется с заранее известными компонентами, и каждая часть может быть спроектирована независимо. Такой метод удобен для модульных систем, когда сборка состоит из стандартных элементов.

- **Top-Down** предпочтителен при проектировании сложных систем, когда не все детали известны на начальном этапе. Этот подход позволяет лучше контролировать зависимость между компонентами, создавать их в контексте всей системы и легко вносить изменения на уровне всей сборки.

Оба метода могут сочетаться в рамках одного проекта. Например, стандартные детали можно разрабатывать по принципу bottom-up, а ключевые компоненты системы — по принципу top-down. Такое сочетание оптимально при проектировании сверхпроводящего циклотрона. Основные системы циклотрона, такие как магнитная и ускоряющая, задаются в общей сборке на раннем этапе, а отдельные элементы, например, пробник, дефлектор и магнитные фокусирующие каналы, сначала разрабатываются отдельно, а затем интегрируются в общую систему.

РАСЧЕТЫ В CST STUDIO

В основе моделирования работы отдельных систем циклотрона лежат в основном программы, основанные на методе конечных элементов. Основным инструментом для наших расчетов выступает комплекс программных модулей CST Studio. Однако для контроля мы регулярно проводим верификацию полученных результатов, сравнивая их с данными, рассчитанными в других программах, таких как Comsol [7] и Tosca [8].

Для разных систем циклотрона используются разные модули CST, такие как магнитостатический, электростатический, RF Eigenmode для анализа собственных мод резонаторов, а также Conjugate Heat Transfer для теплового анализа. Эти инструменты позволяют решать задачи различной сложности с высокой точностью.

Расчет высокочастотных систем. Модуль Eigenmode в CST Studio Suite позволяет находить и исследовать собственные частоты и соответствующие им поля в системах, где электромагнитные волны могут формировать стоячие волны. Этот тип анализа широко используется при проектировании резонаторов ускоряющих систем циклотронов.

В зависимости от задачи, модуль может использовать различные численные методы для нахождения собственных мод. Метод конечных элементов (FEM) более точен для сложных геометрий, а метод конечных интегралов (FIT) используется для быстрого расчета больших структур. Eigenmode предоставляет пользователю возможность визуализировать поля в различных модах, что помогает разработчикам лучше понять, как распределяются и взаимодействуют поля в устройстве. Модуль может учитывать материалы с потерями (например, проводники с потерями или диэлектрики с поглощением), рассчитывать добротность (Q-фактор) резонаторных структур. Это важно для оценки энергетических потерь и качества резонанса.

При проектировании ВЧ-резонаторов ключевыми задачами являются обеспечение требуемой собственной частоты, оптимального распределения ускоряющего напряжения вдоль радиуса и минимизация потерь мощности. Для решения этих задач достаточно использовать модуль Eigenmode. Однако при анализе работы ВЧ-системы также важен детальный анализ теплового распределения в резонаторах (модуль Conjugate Heat Transfer (CHT) Solver), что играет ключевую роль при расчетах системы охлаждения. Равномерное распределение тепла необходимо для обеспечения надежного теплового контакта между элементами резонатора, что, в свою очередь, гарантирует стабильную и безопасную работу системы в процессе эксплуатации. Такой подход позволяет минимизировать риски перегрева и деформаций, обеспечивая долговечность и высокую производительность ВЧ-системы.

Важным результатом расчетов высокочастотных ускоряющих систем циклотрона являются карты электромагнитного поля, используемые для расчета движения частиц.

Расчет магнитной системы. Магнитостатический модуль в CST Studio — это специализированный инструмент для расчета статических магнитных полей, создаваемых постоянными магнитами, катушками с постоянным током или магнитными материалами. Модуль использует метод конечных элементов. FEM позволяет рассматривать структуры с учетом сложной геометрии и границ с различными условиями. Модуль поддерживает различные типы граничных условий, такие как условие симметрии, периодичности или условия «в бесконечность», что позволяет моделировать как замкнутые, так и открытые магнитные системы. Важной функцией модуля является возможность работы с материалами с нелинейными характеристиками (например, ферромагнитными материалами), у которых магнитная проницаемость зависит от напряженности поля. Одна из ключевых возможностей модуля — расчет сил магнитного притяжения или отталкивания, а также крутящих моментов в системах, где участвуют токи или постоянные магниты. Пользователь получает возможность визуализировать магнитные поля и потоки, что помогает лучше понять поведение устройства или системы. Расчет магнитной системы циклотрона заключается в проведении итерационных процедур в магнитостатическом модуле CST Studio с последующим анализом карты магнитного поля в медианной плоскости на замкнутых равновесных орбитах по программе CORD. Основная задача расчета — создание магнитного поля, которое обеспечит поперечную устойчивость и синхронность ускорения пучка частиц с ускоряющим полем в циклотроне.

Расчет электростатических элементов: инфлектора и дефлектора. Модуль электростатики в CST Studio Suite используется для решения задач, связанных с распределением электрического поля в стационарных условиях, когда заряды и потенциалы не изменяются во времени. Модуль применяется для проектирования и оптимизации различных устройств, таких как конденсаторы, сенсоры, для анализа электростатических взаимодействий в сложных системах. Модуль поддерживает различные типы граничных условий, такие как проводящие, диэлектрические или симметричные границы, использует метод конечных элементов.

В циклотронах этот модуль полезен для проектирования и оптимизации таких устройств, как спиральный инфлектор и дефлектор, предназначенных для инъекции и вывода пучка заряженных частиц, иногда применяется в расчетах центральной области.

РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В Matlab

Анализировать результаты расчетов моделей отдельных систем циклотрона приходится, как правило, с помощью программ, созданных самими разработчиками. Основные программы, необходимые для разработки циклотрона, включают возможности анализа движения частиц на замкнутых равновесных орбитах и трассировки пучка, интегрирующие системы дифференциальных уравнений движения (чаще всего методом Рунге–Кутты четвертого порядка). Проектируя магнитную систему циклотрона, необходимо обеспечить изохронизм, создаваемого магнитного поля и диаграмму бетатронных частот, обеспечивающую поперечную стабильность пучка.

Замкнутые равновесные орбиты. CORD (Closed ORbit Dynamics) — программа для анализа карт магнитных и ускоряющих полей на равновесных замкнутых орбитах, включающая в себя следующие основные компоненты:

1. Анализ карты магнитного поля. Итерационная процедура для нахождения равновесных орбит. Расчет частоты обращения и бетатронных частот.

2. Анализ карты электрического ВЧ-поля. Расчет ускоряющего напряжения. Расчет фазового движения.

Анализируя карту магнитного поля, программа предоставляет информацию о среднем и изохронном поле, низших и кратных гармониках структуры магнита, флаттере, частотах бетатронных колебаний и частоте обращения частиц в зависимости от радиуса.

Анализ ускоряющего поля дает информацию об азимутальной протяженности резонаторов, распределении ускоряющего напряжения по радиусу, максимальном наборе энергии за оборот, шаге орбиты, числе оборотов, а также о фазовом движении центральной частицы.

Анализ карт электромагнитного поля на равновесных орбитах достаточен для выбора структуры магнита, включая размер и форму секторов, а также для определения геометрии резонаторов с требуемой частотой и зависимостью напряжения вдоль радиуса. Для проектирования центральной области циклотрона и разработки системы вывода пучка из циклотрона необходимо проводить расчеты движения пучка в рассчитанных картах электромагнитного поля.

Трассировка пучка. В исследовании динамики пучка мы традиционно используем трехмерные карты магнитного и электромагнитного ускоряющего поля, полученные в результате расчетов магнита в магнитостатическом модуле и высокочастотных резонаторов в модуле Eigenmode программы CST Studio. Программа интегрирования уравнений движения написана в Matlab и позволяет делать расчет потерь на элементах структуры ускорителя, амплитуд радиальных колебаний и, при необходимости, учет эффектов пространственного заряда.

Для расчета ускорения пучка необходим высококачественный расчет электромагнитного поля, требующий использования большого числа ячеек сетки, что существенно увеличивает вычислительные затраты и требует мощных вычислительных ресурсов. Высокая производительность компьютеров является критически важной для обеспечения точности моделирования и анализа ускоренного движения частиц.

Использование среды Matlab предоставляет разработчику богатые возможности визуализации проведенных расчетов, позволяющие демонстрировать пучок ускоряемых частиц на фоне компьютерной модели рассчитываемого циклотрона. Пример на-

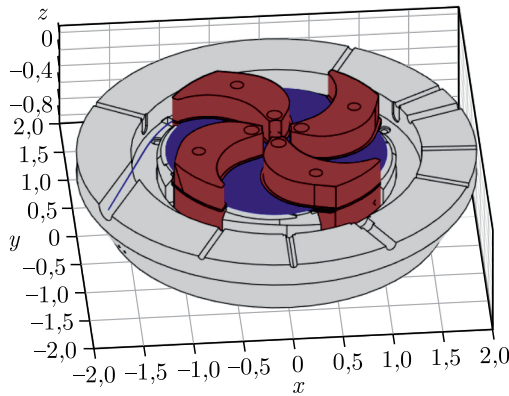


Рис. 2. Траектории пучка в ускорителе

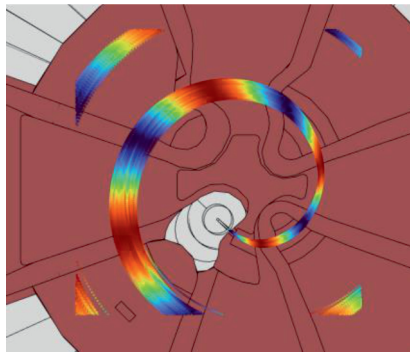


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Траектории пучка в центральной области. Цвет траекторий отражает фазу колебаний электромагнитного поля ускоряющей системы

глядной визуализации движения пучка на фоне 3D-модели циклотрона представлен на рис. 2, 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Виртуальное прототипирование при работе с подходом от сборки к частям (top-down) обеспечивает комплексный подход к разработке циклотрона, что позволяет создавать его оптимальную конструкцию. Применение ВП дает возможность тестировать цифровые модели устройства в виртуальной среде, что значительно сокращает затраты на физическое проектирование. Однако отдельные системы, такие как ионный источник и дефлектор, по-прежнему требуют проведения стендовых испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MATLAB. The MathWorks, Inc., Natick, MA, United States.
2. <https://www.solidworks.com/>
3. <https://www.cst.com>

4. *Karamyshev O. et al.* CORD (Closed Orbit Dynamics): A New Field Map Evaluation Tool for Cyclotron Particle Dynamics // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2021. V. 18, No. 4. P. 481–487.
5. *Karamysheva G., Gurskiy S., Karamyshev O., Yang Q., Zheng J. et al.* Compact Superconducting Cyclotron SC200 for Proton Therapy // *Proc. 21st International Conference on Cyclotrons and Their Applications (CYC 2016)*. 2016. P. 371–373.
6. *Karamysheva G., Popov D., Karamyshev O., Ding K., Song Y. et al.* Influence of the RF Magnetic Field on Beam Dynamics in SC200 Cyclotron // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2019. V. 940. P. 61–65.
7. *Karamyshev O. et al.* Research and Development of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2021. V. 18, No. 1. P. 63–74.
8. <https://www.comsol.com/>
9. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/opera>

Получено 28 октября 2024 г.