

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО “САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО”

Факультет нелинейных процессов
Кафедра электроники колебаний и волн
Кафедра физики открытых систем

ФГБОУ ВО “САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.”
Кафедра “Автоматизация, управление, мехатроника”

А.А. Короновский (мл.), С.А. Куркин, А.Е. Храмов

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Основы моделирования систем радиофизики и
сверхвысокочастотной электроники в программном
пакете CST Particle Studio

Саратов, 2016 г.

Оглавление

1	Введение	3
2	Интерфейс программы	6
2.1	Начало работы с проектом	6
2.2	Главное меню проекта	12
3	Создание трехмерных структур	17
3.1	Создание простых геометрических фигур	17
3.2	Выбор элементов фигур	22
3.3	Трансформации фигур	23
3.4	Использование булевых операций	31
3.5	История модификаций проекта и свойства объектов	32
4	Моделирование рабочего процесса в среде CST Particle Studio	38
4.1	Инструмент создания и настройки рабочей сетки	38
4.2	Инструмент моделирования эмиссии частиц	41
4.3	Инструмент Ports для задания портов — активных и пассивных элементов модели	44
4.4	Задание дополнительных параметров рабочего процесса	48
5	Постобработка и оформление результатов исследования	50
5.1	Использование шаблонов постобработки	50
5.2	Использование дополнительных возможностей	54
6	Постановка и решение задач в модуле программы CST Particle Studio	55

6.1	Получение и анализ анодного тока. Качественная оценка закона $3/2$ для релятивистского электронного пучка	56
6.1.1	Теоретический анализ процессов в диодном промежутке	56
6.1.2	Разработка модели диодного промежутка для моделирования процессов динамики пучка в присутствии пространственного заряда	57
6.1.3	Моделирование процессов в диодном промежутке и обработка результатов	71
6.1.4	Задания для самостоятельного исследования	75
6.2	Формирование виртуального катода в эквипотенциальном пространстве дрейфа	76
6.3	Турботрон	84

Глава 1

Введение

Данное учебно-методическое пособие разработано для получения начальных сведений и опыта работы с программным пакетом CST Particle Studio, входящим в CST STUDIO SUITE и предназначенным для моделирования систем радиофизики и электроники. В пособии содержится вся необходимая информация для ознакомления и начала работы в среде CST Particle Studio.

Главными достоинствами программы является возможность непосредственного 3D-моделирования различных классов объектов в широком диапазоне масштабов, автоматизированный численный анализ физических процессов с учетом разнообразных факторов, а также широкие возможности экспорта полученных результатов в другие программные продукты, в частности, в систему автоматического проектирования AutoCAD.

Программный продукт CST STUDIO SUITE позволяет заниматься проектированием систем электроники и электродинамики сверхвысоких частот (СВЧ) различной сложности путем постановки задач численного моделирования и расчета физических процессов с высокой точностью и достоверностью с приближением к реальным условиям; обрабатывать и анализировать полученные в ходе численного моделирования результаты.

Программный продукт CST STUDIO SUITE разделена на модули, имеющие общий принцип работы и тесно связанные между собой, каждый из которых имеет конкретную направленность в решении прикладных физических задач:

- CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) – модуль программы для быстрого и точного численного расчета электродинамических параметров электродинамических систем.
- CST EM STUDIO (CST EMS) – модуль программы для моделирования статических и низкочастотных электромагнитных полей.
- CST PARTICLE STUDIO (CST PS) – специализированный пакет для самосогласованного анализа поведения заряженных частиц в электромагнитных полях и моделирования таких электровакуумных устройств, как электронные пушки, катодные лучевые трубки, виркаторы, клистроны, ЛБВ, ЛОВ, магнетроны и др.
- CST CABLE STUDIO (CST CS) – специализированный пакет для моделирования электромагнитных эффектов в кабелях линиях передачи.
- CST PCB STUDIO (CST PCBS) – инструмент, позволяющий выполнять анализ целостности сигналов и перекрестных искажений на высокоскоростных цифровых, смешанных аналого-цифровых платах, а также в источниках питания.
- CST MPHYSICS STUDIO (CST MPS) – специализированный пакет для анализа тепловых и механических нагрузок элементов электронных устройств.
- CST MICROSTRIPES (CST MS) – альтернативный модуль 3D электромагнитного моделирования во временной области, ориентированный на анализ электромагнитной совместимости.
- CST DESIGN STUDIO – инструмент, позволяющий разбить сложное устройство на отдельные части, промоделировать их по отдельности и затем интегрировать полученные данные в единое целое.

В настоящем учебно-методическом пособии представлен необходимый материал для начала работы в среде CST Particle Studio. Разделы, представленные в пособии, рекомендуется читать последовательно, одновременно с этим разбирать каждый шаг описанных действий непосредственно в программном продукте.

После прочтения данного пособия, успешного завершения задач, рассмотренных в качестве учебных, и решения заданий, предложенных для самостоятельной работы, пользователь сможет самостоятельно заниматься моделированием сложных нелинейных процессов в СВЧ-устройствах, оптимизацией их характеристик и получением результатов численного моделирования в среде CST Particle Studio.

Для постановки более сложных и комплексных задач в программе следует, прежде всего, выбрать тематическую направленность задачи (одна задача может потребовать использования различных модулей программы) и при необходимости обращаться к соответствующей документации в разделе Online Help программы.

Глава 2

Интерфейс программы

2.1 Начало работы с проектом

После успешной установки программного обеспечения запустить программу можно из раздела меню Пуск операционной системы Microsoft Windows 7/8/10. Для открытия программы следует выбрать пункт Пуск | Программы | CST STUDIO SUITE 2016.

При открытии программы на экране появится главное окно среды проектирования CST STUDIO SUITE 2016, показанное на рисунке 2.1. Рассмотрим подробнее главное окно создания проектов.

В левой стороне окна находится стандартный набор команд для открытия, закрытия и сохранения проектов пользователя. Ниже расположен менеджер управления проектами. В нижней части окна расположены кнопки вызова модулей программы, о которых говорилось во Введении к методическому пособию. В центральной части слева находится шаблон создания нового проекта. В центральной части справа расположен список недавно открытых проектов.

После нажатия на шаблон появляется окно, позволяющее выбрать требуемую заготовку для проекта (рис. 2.2). Для удобства шаблоны проектов разделены на тематики и содержат в себе несколько подкаталогов (рис. 2.3).

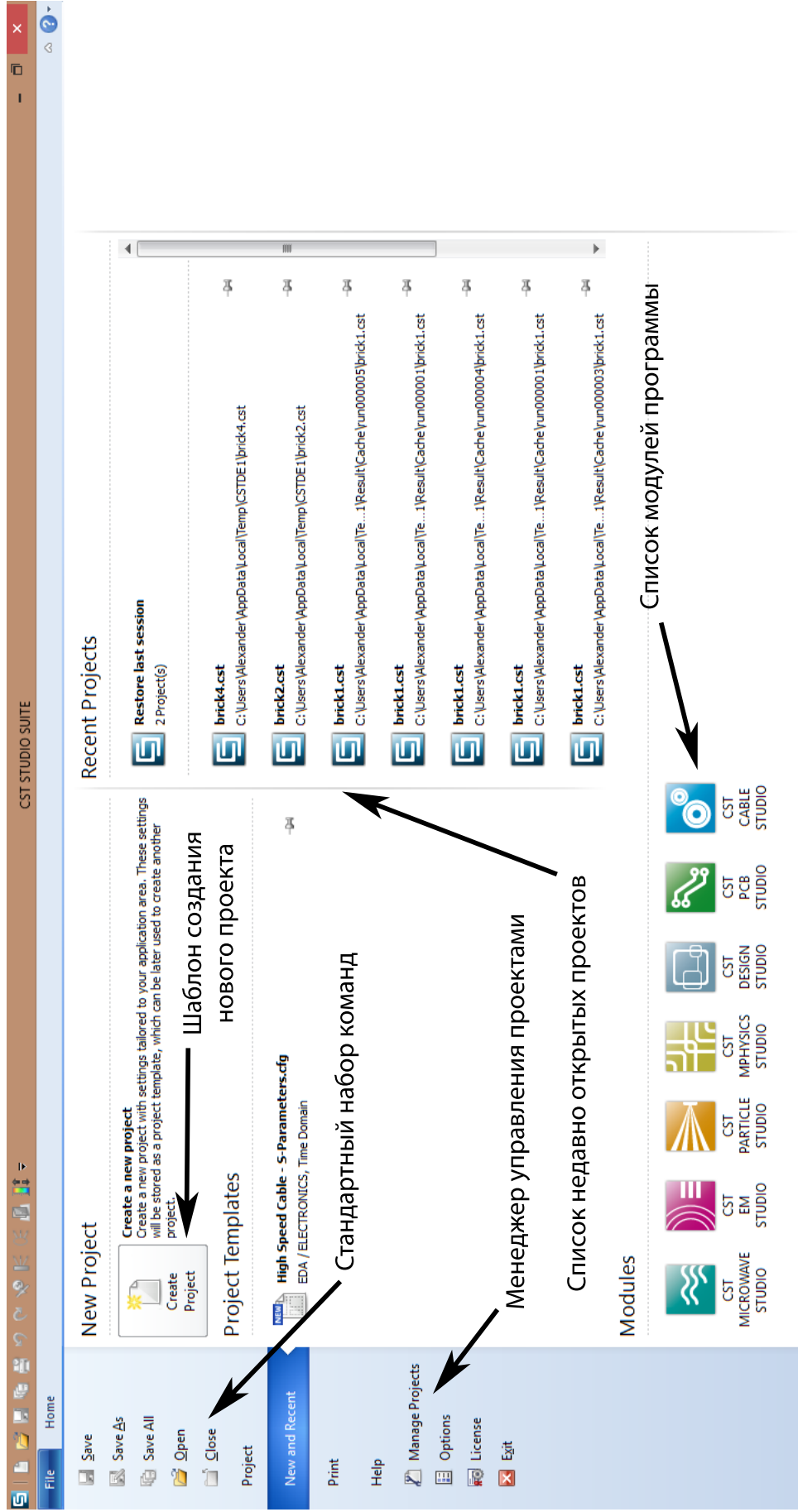


Рис. 2.1: Стартовое окно программы CST STUDIO SUITE 2016

Для того, чтобы создать новый проект, необходимо сначала выбрать модуль программы, соответствующий классу решаемой задачи. Как говорилось ранее, модули тесно связаны друг с другом, и одну задачу можно решать с использованием различных модулей CST.

Для дальнейшего ознакомления с программой откроем шаблон создания проекта в модуле CST Particle Studio. При нажатии на значок модуля появляется окно, предлагающее выбрать уже созданный по шаблону проект, используемый в выбранном модуле программы (рис. 2.4). Во всплывающем окне выберем вариант «Do not use a project template». После выбора откроется окно нового проекта.

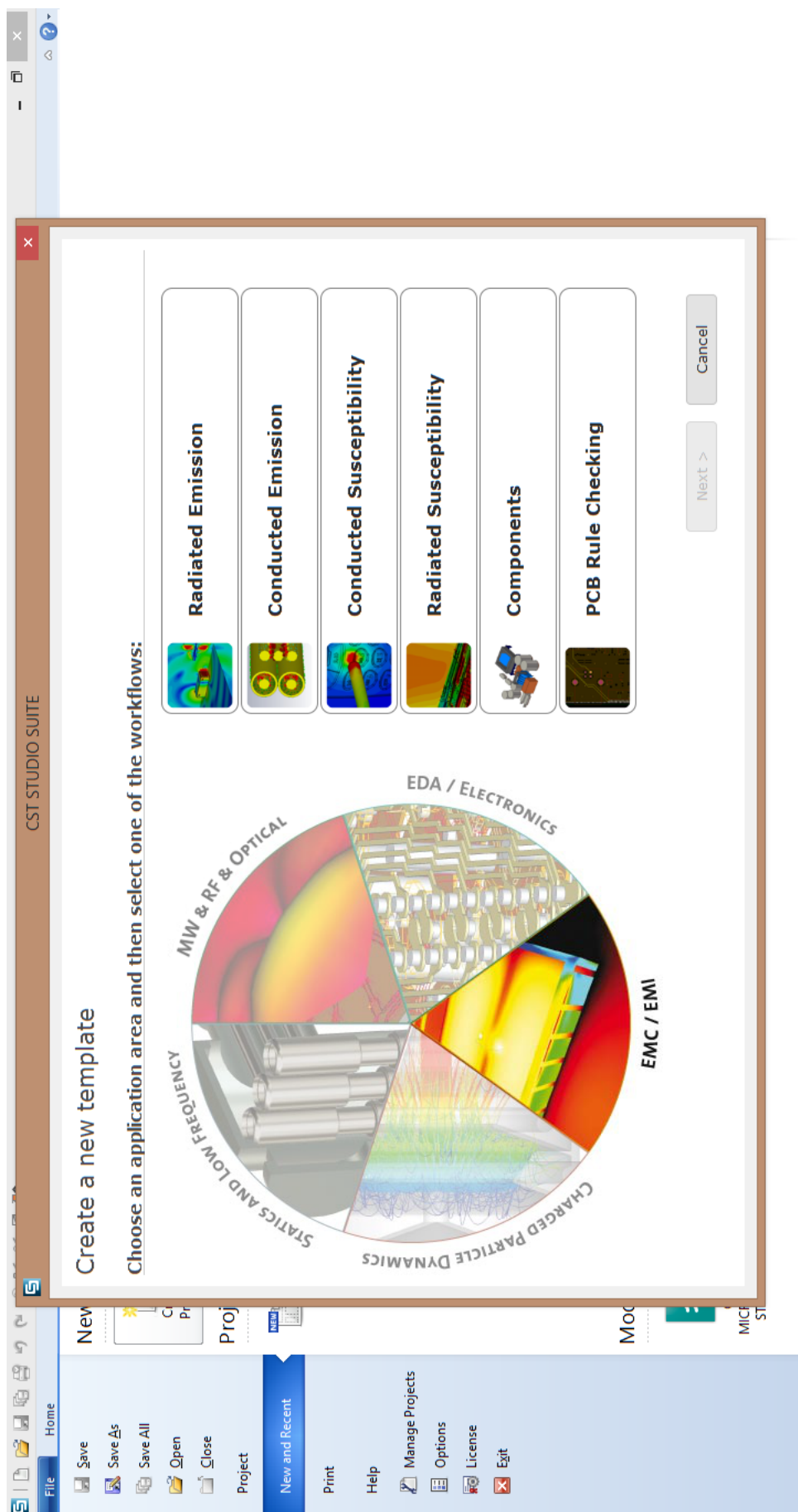


Рис. 2.2: Окно выбора шаблонов проекта

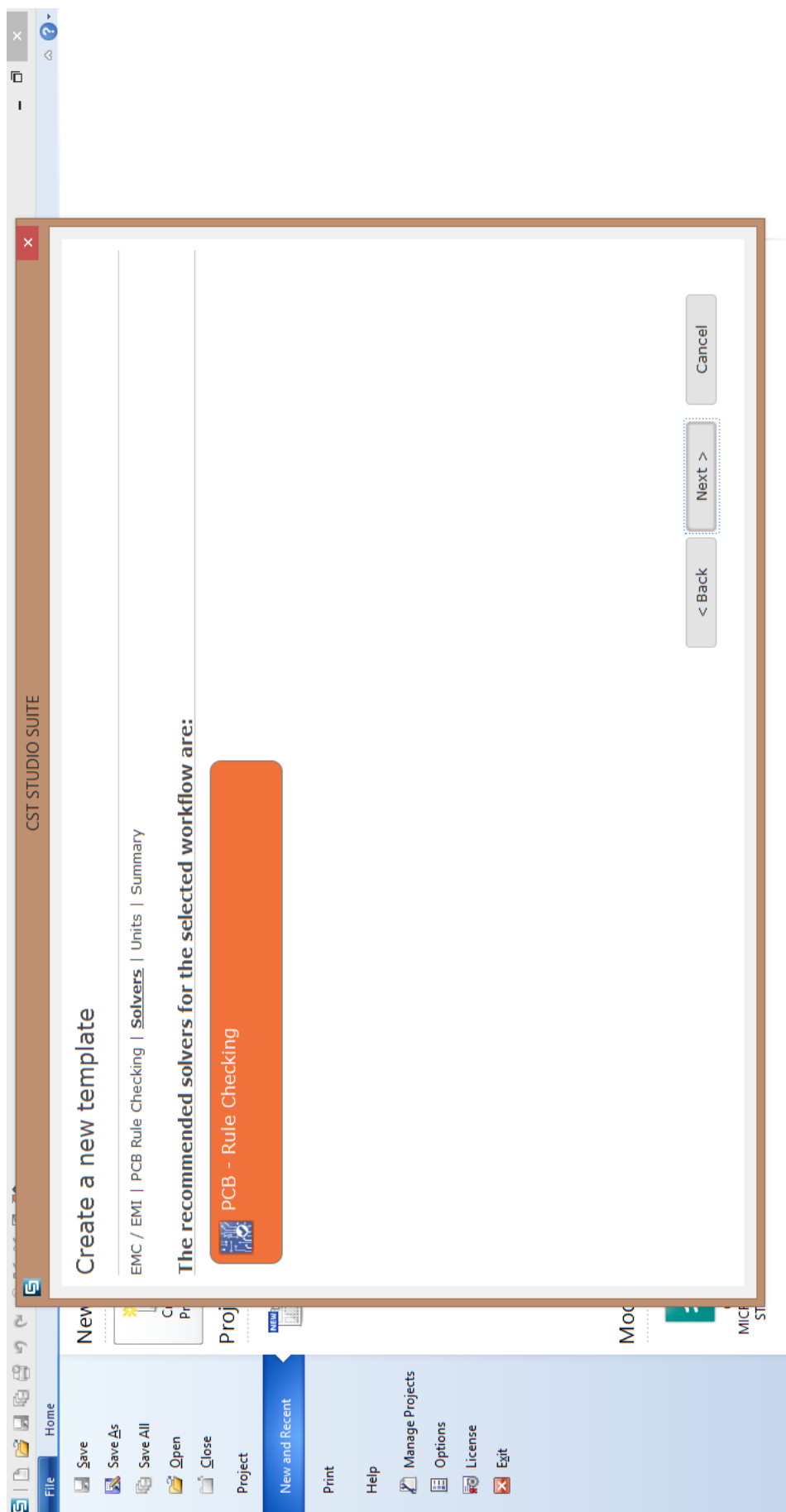


Рис. 2.3: Дополнительные готовые шаблоны для проекта

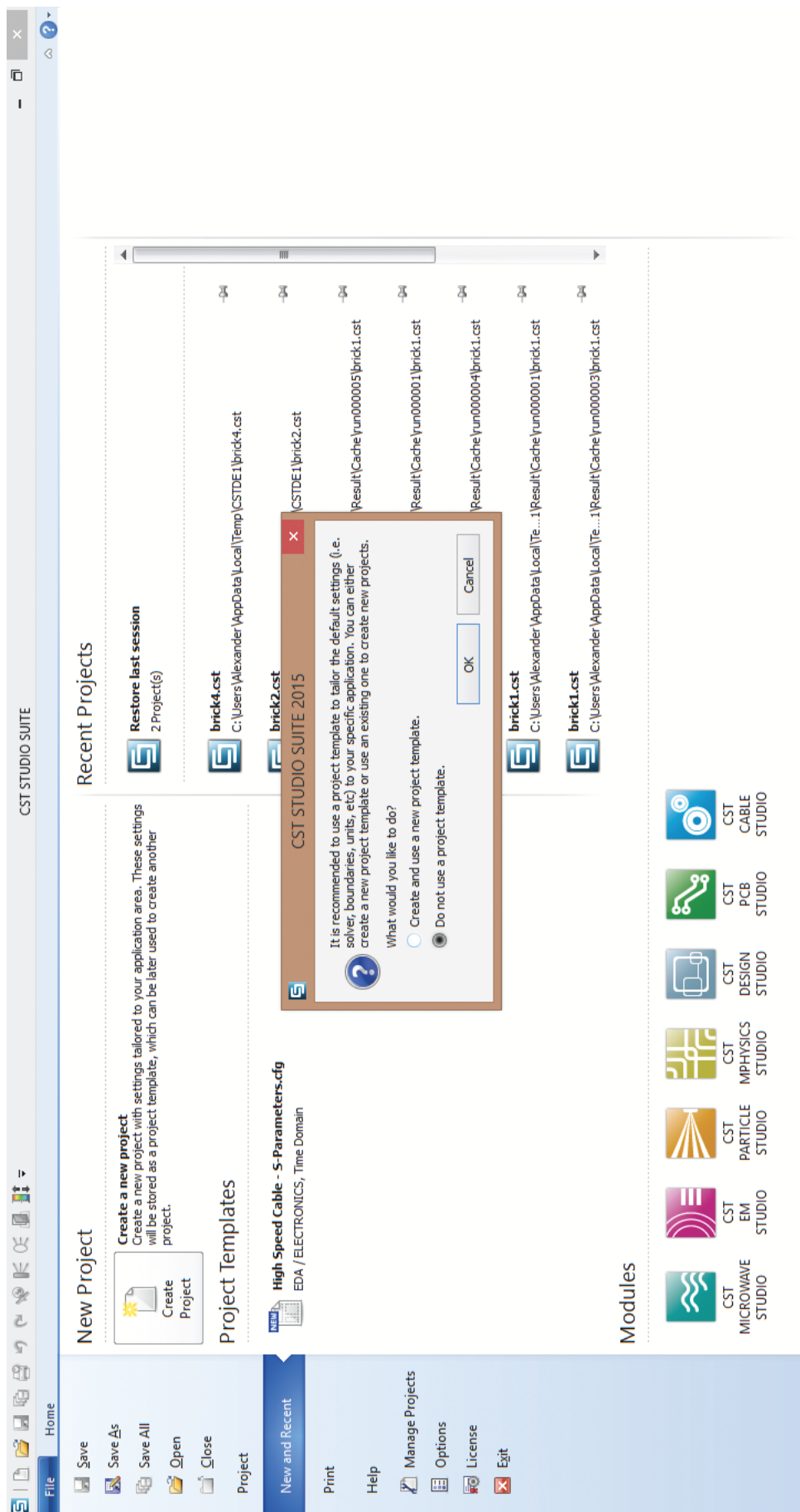


Рис. 2.4: Выбор использования готового шаблона

2.2 Главное меню проекта

Открывшееся окно нового проекта является стандартным независимо от модуля программы и режима, в котором работает пользователь. Окно проекта, изображенное на рисунке 2.5, состоит из следующих основных компонентов:

- Дерево проекта (Navigation Tree)
- Пространство рисования (геометрического визуального моделирования) исследуемого объекта
- Список заданных параметров (Parameter List)
- Окно сообщений (Messages)
- Окно информации о ходе эксперимента (Progress)
- Панель задания размерностей
- Главное меню
- Панель инструментов

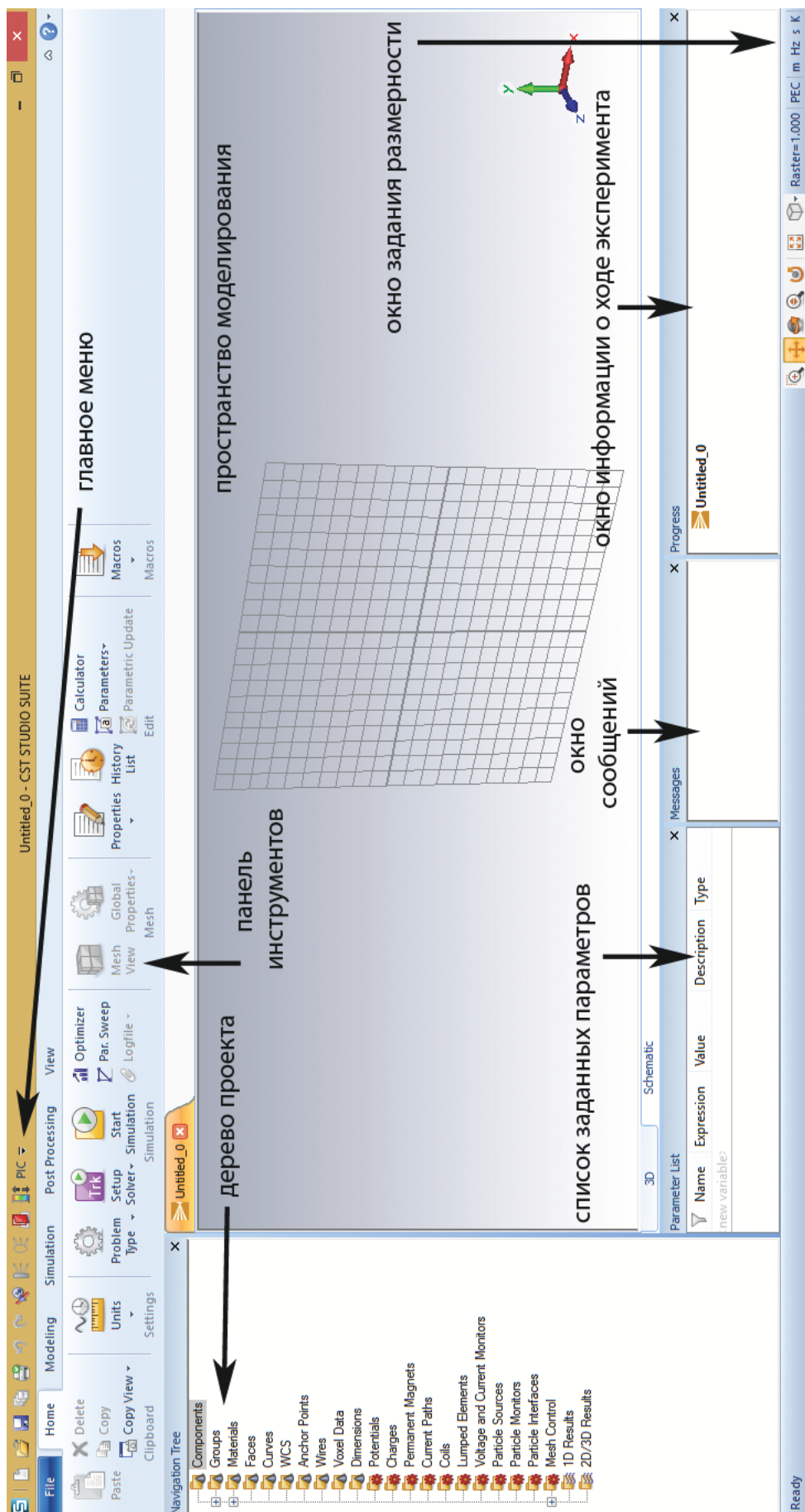


Рис. 2.5: Окно нового проекта

Дерево проекта расположено в левой части открывшегося окна. Оно является неотъемлемой частью проекта, в каждом из подкаталогов которого содержится информация о том или ином объекте или процессе, заданном в программе.

Пространство рисования — это основная часть окна, где непосредственно создаются трехмерные объекты и отслеживается ход эксперимента в реальном времени. Главным достоинством такого подхода является наглядность отображения объектов различных классов, заданных пользователем, и результатов моделирования.

В пространстве рисования задана система координат XYZ , и для наглядности установлена сетка декартовых координат XOY . Созданный объект отображается в двумерной проекции, которую легко изменить с помощью одновременного нажатия левой кнопки мыши и клавиш Shift или Ctrl. Простота и наглядность в создании сложных трехмерных объектов в программе CST STUDIO SUITE делает процесс разработки модели удобным и интуитивно понятным для всех классов решаемых задач.

В нижней панели окна слева расположена форма Parameter List, которую удобно использовать при установке значений параметров модели. В середине нижней панели расположено окно сообщений системы. Сообщения выдаются, например, при успешном завершении поставленного эксперимента в программе или, наоборот, при возникновении тех или иных ошибок. В нижней панели справа окно Progress наглядно демонстрирует информацию о ходе численного моделирования в реальном времени.

В нижнем правом углу окна находится панель задания размерностей, позволяющая задавать единицы измерения, используемые при моделировании системы. Главное меню программы является стандартным, как и для многих других программ в Windows. Панель инструментов содержит разделы с инструментами и пунктами меню, помогающими при разработке модели и постановке эксперимента. Конкретные подпункты панели инструментов программы зависят от того, в каком модуле и в каком режиме работает пользователь.

Контекстное меню (рис. 2.6) вызывается нажатием правой кнопки мыши и обеспечивает удобный доступ к часто используемым командам, доступным для данной части проекта, например, при задании или изменении свойств выбранного с помощью мыши объекта. Содержание этого меню постоянно изменяется в зависимости от объекта, с которым работает пользователь.

Важное замечание. Не все команды, используемые при работе, могут отображаться в панели инструментов или в контекстном меню. Часто удобнее вывести команду в главное меню проекта. Для этого вверху главного меню проекта после кнопок, предназначенных для создания, сохранения файла и прочих функций, содержится кнопка настройки панели быстрого доступа, как и в других Windows-программах.

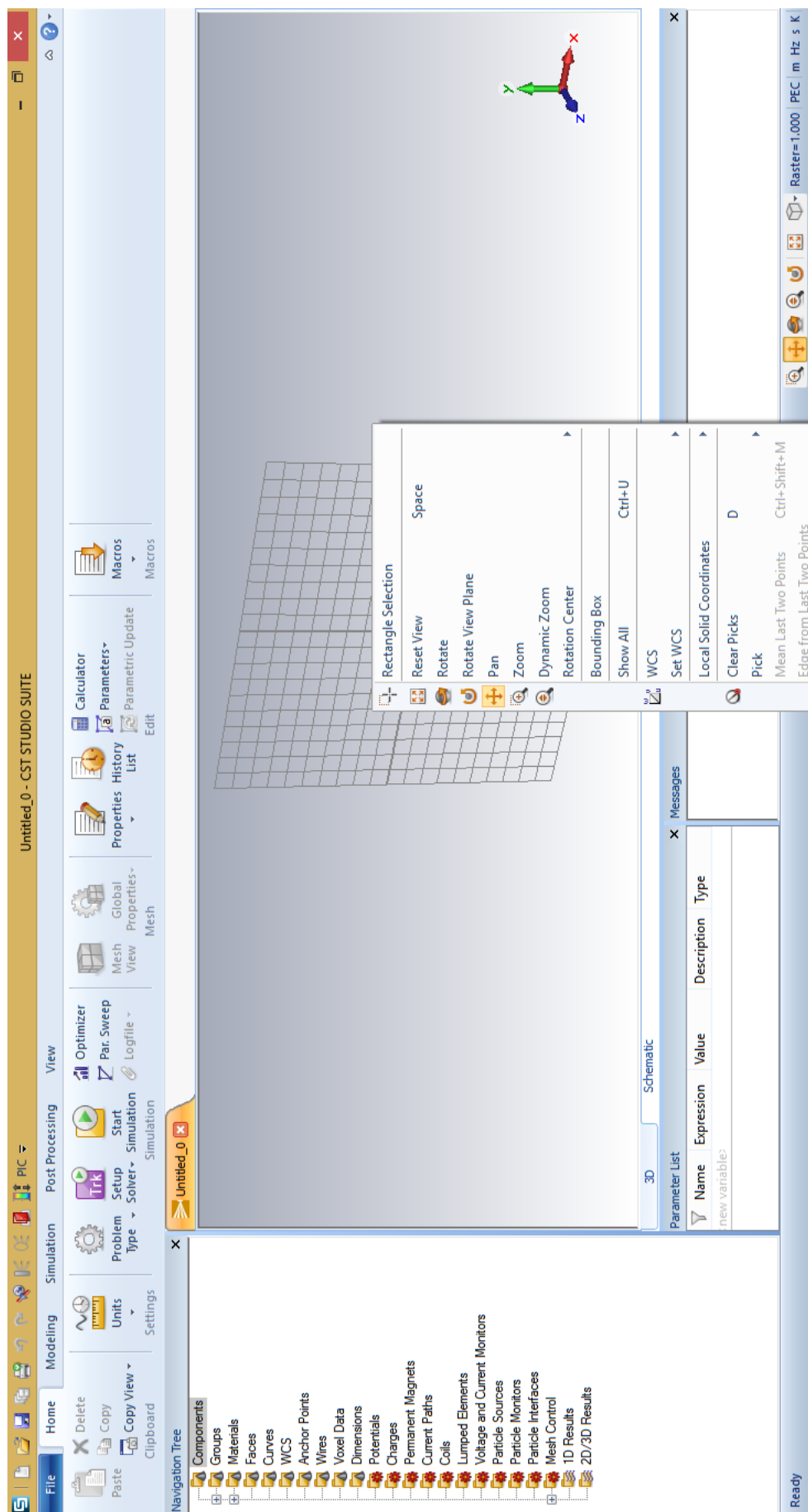


Рис. 2.6: Вид контекстного меню

Глава 3

Создание трехмерных структур

3.1 Создание простых геометрических фигур

Для того, чтобы начать процесс моделирования, после открытия окна нового проекта следует в панели инструментов проекта выбрать раздел

Modeling. После чего в разделе Modeling выберем подраздел Shapes, в котором находятся кнопки со схематичным изображением геометрических примитивов.

Рассмотрим простой пример создания геометрических объектов в среде моделирования.

Выберем и кликнем кнопку с изображением параллелепипеда. Задание точек выбранной фигуры выполняется двойным щелчком левой кнопки мыши, однако, в большинстве случаев для поставленной задачи необходима высокая точность и детальная проработка моделируемых фигур. Поэтому после выбора точек, характеризующих параметры геометрических фигур, например, грани у параллелепипеда, радиусы у шара и тора, высоту у цилиндра и конуса и др., автоматически открывается окно задания координат выбранных точек (рис. 3.1), которое позволяет редактировать положение фигуры в пространстве и её размеры.

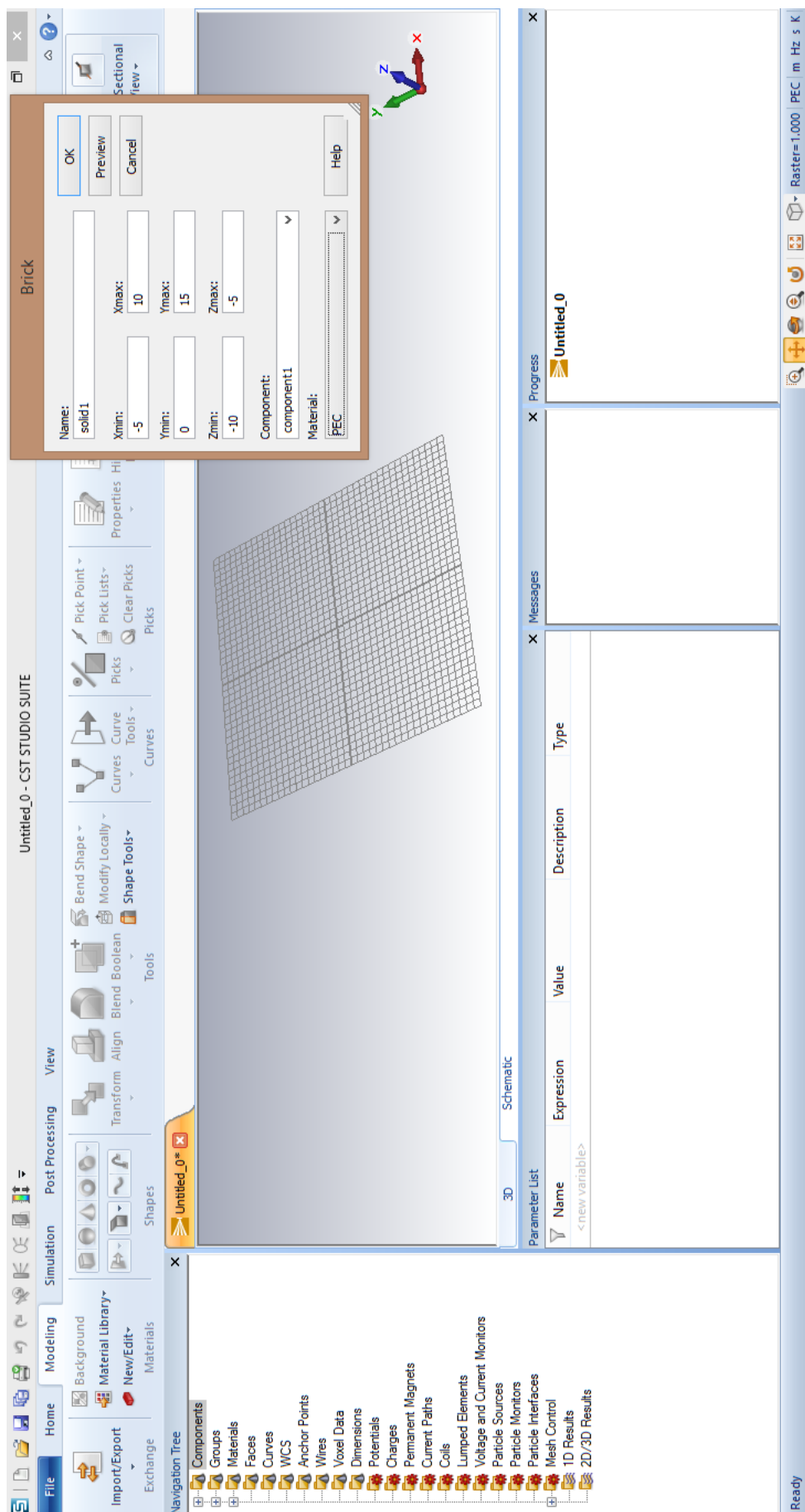


Рис. 3.1: Окно задания координат объекта

Следует отметить, что удобно использовать расположенную в верхней правой части окна кнопку Preview, которая позволяет схематично отобразить моделируемый объект в пространстве.

Также параметры моделируемых фигур можно задать непосредственно аналитически, для этого сразу после выбора геометрической фигуры в панели инструментов следует нажать клавишу Esc — после этого появится окно с заданием параметров объекта. Пример созданного объекта будет выглядеть в одной из проекций следующим образом (рис. 3.2).

По такому же принципу можно создавать другие геометрические фигуры, наиболее часто использующиеся для построения моделей в различных физических задачах. Удобство в моделировании также связано с получением многообразия простых геометрических фигур при задании их свойств. Например, можно задать простой шар или цилиндр, и также можно создать усеченный конус, цилиндр с внутренним радиусом, эллипс и др.

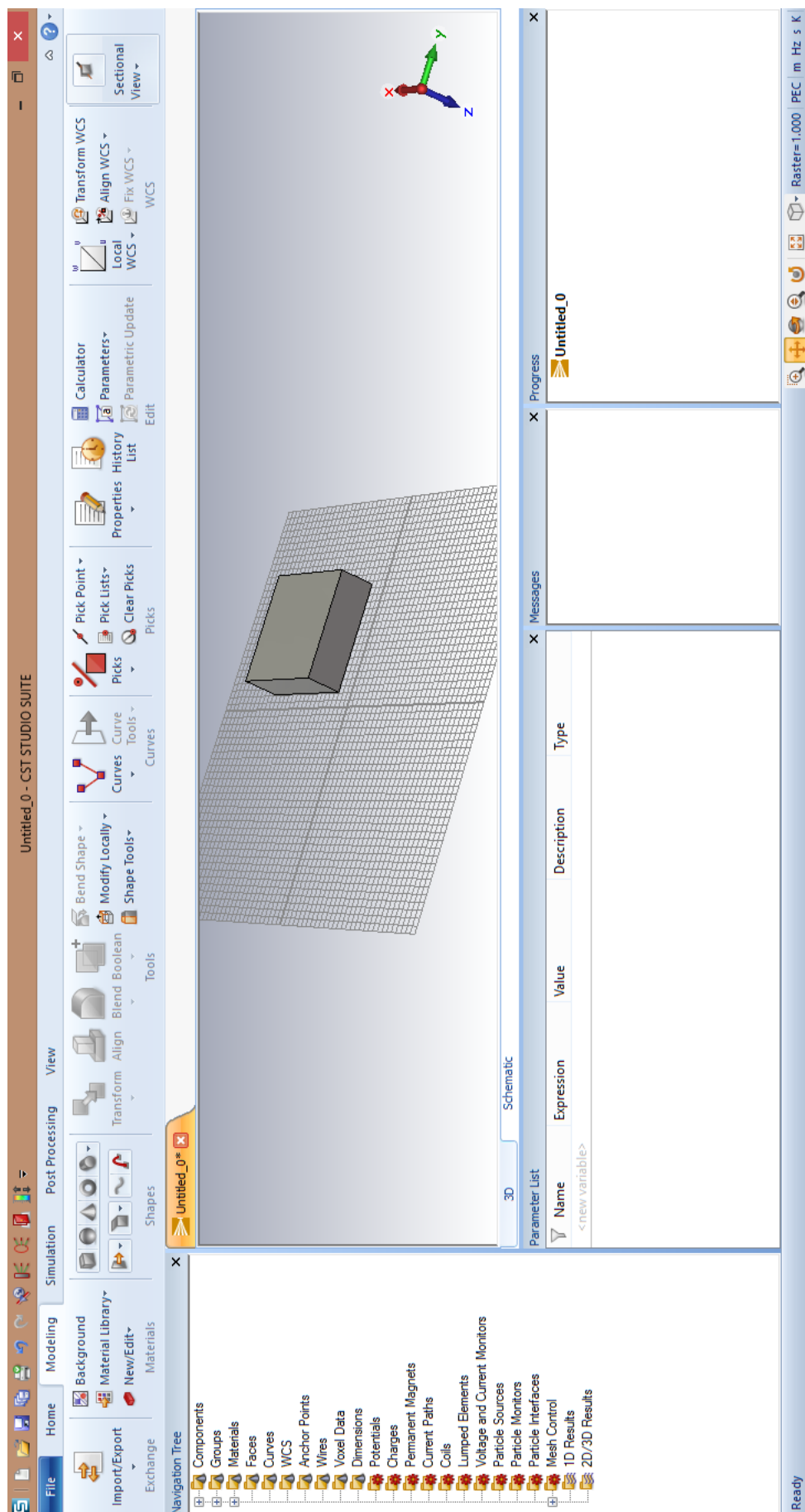


Рис. 3.2: Вид созданного объекта

Также при задании параметров объекта внизу всплывающего окна (рис. 3.1) содержится меню выбора материала данного объекта. Войдя с помощью мыши в это меню, можно выбрать и/или загрузить материал из Библиотеки материалов. В Библиотеке материалов можно непосредственно ознакомиться со свойствами предлагаемых материалов, например, металлов (золото, серебро, алюминий и др.), диэлектриков, полупроводниковых материалов и др.

Созданный объект, информация о нём и его свойства отображаются в дереве проекта. Переход к тому или иному объекту осуществляется через узел Components в дереве проекта путем выбора фигуры из каталога компонентов. Также к объекту можно перейти непосредственно в среде моделирования с помощью двойного клика левой кнопкой мыши по выбранной фигуре. Можно выбирать сразу несколько фигур, удерживая клавишу Ctrl. Также можно и отменять выделение выбранных ранее объектов. Если необходимо выбрать сразу несколько фигур, то следует, нажав и удерживая на клавиатуре Shift, выбрать в дереве проекта любую другую необходимую фигуру. В результате будут выбраны все фигуры между первым и вторым объектами.

Выбранные одну или несколько фигур можно удалить, нажав после выделения клавишу Delete, или выделив фигуру и кликнув правой кнопкой мыши в контекстном меню, выбрать пункт "Удаление фигуры". Отменить предыдущее действие создания или удаления фигуры можно стандартным для многих Windows-программ способом, используя комбинацию горячих клавиш Ctrl+Z. Для этой цели может также использоваться команда Undo в главном меню.

Для того, чтобы скрыть объект, например, для удобства дальнейшей прорисовки модели, следует после выбора объекта в окне моделирования или в дереве проекта использовать комбинацию клавиш Ctrl+H; чтобы показать скрытый объект, следует использовать комбинацию Ctrl+U.

3.2 Выбор элементов фигур

Очень часто в процессе построения структур требуется выбор какой-либо точки, ребра или грани геометрической фигуры. Выбор этих простейших элементов структуры осуществляется с помощью команд, обозначенных специальными кнопками в панели инструментов, которые располагаются в Modeling | Picks. На практике удобным является использование горячих клавиш, выполняющих следующие команды:

- Pick edge end points (P) — выбор конца ребра.
- Pick edge mid points (M) — выбор середины ребра.
- Pick circle centers (C) — выбор центра окружности; выбрать можно непосредственно центр или окружность, центр которой определяется программой.
- Pick points on circles (R) — выбор точки на окружности.
- Pick face centers (A) — выбор центра грани.
- Pick point on face (o) — выбор точки на поверхности.
- Pick edges (E) — выбрать ребро.
- Pick faces (F) — выбор грани.
- Pick edge chain (Shift+E) — выбор цепочки связанных ребер. Если цепочка ребер является свободной, то она выбирается целиком, если ребро принадлежит двум граням, то появившееся диалоговое окно предложит выбрать нужную цепочку. В обоих случаях цепочка заканчивается на ранее выбранной точке, если таковая имеется.
- Pick face chain (Shift+F) — выбор нескольких связанных граней. Эта функция автоматически выбирает все соприкасающиеся поверхности. Выбор ограничивается ранее выбранными ребрами, если таковые имеются.

3.3 Трансформации фигур

В процессе создания модели часто бывает недостаточно задания стандартного набора простых геометрических фигур. В программе CST существует набор различных способов по преобразованию, масштабированию, а также созданию новых геометрических форм.

Рассмотрим имеющиеся способы трансформации объектов. Для этого перейдем к фигуре, к которой мы собираемся применить преобразования. Затем, выбрав фигуру, перейдем к разделу меню в панели инструментов Modeling | Tools | Transform и кликнем на данную кнопку — на экране появится окно с заданием настроек трансформации объекта (рис. 3.3). В данном окне содержится несколько типов трансформации: перемещение (Translate), изменение масштаба (Scale), поворот (Rotate) и отражение (Mirror).



Рис. 3.3: Окно настроек трансформации объекта

Рассмотрим подробнее несколько возможных преобразований для созданного ранее параллелепипеда.

В меню выбора трансформаций выберем перемещение (Translate) и применим настройки, показанные на рисунке 3.4. В полях указываются расстояния, на которые будет сдвинута фигура вдоль соответствующих координатных осей; Repetition factor – параметр, который задает, сколько раз повторить данное преобразование. В результате преобразования получим 3 идентичных сдвинутых друг относительно друга параллелепипеда (см. рис. 3.5). Если снять галочку с пункта Copy в панели трансформации фигур, то получим результат, изображенный на рис. 3.6: объект просто переместится в другую часть пространства без копирования.

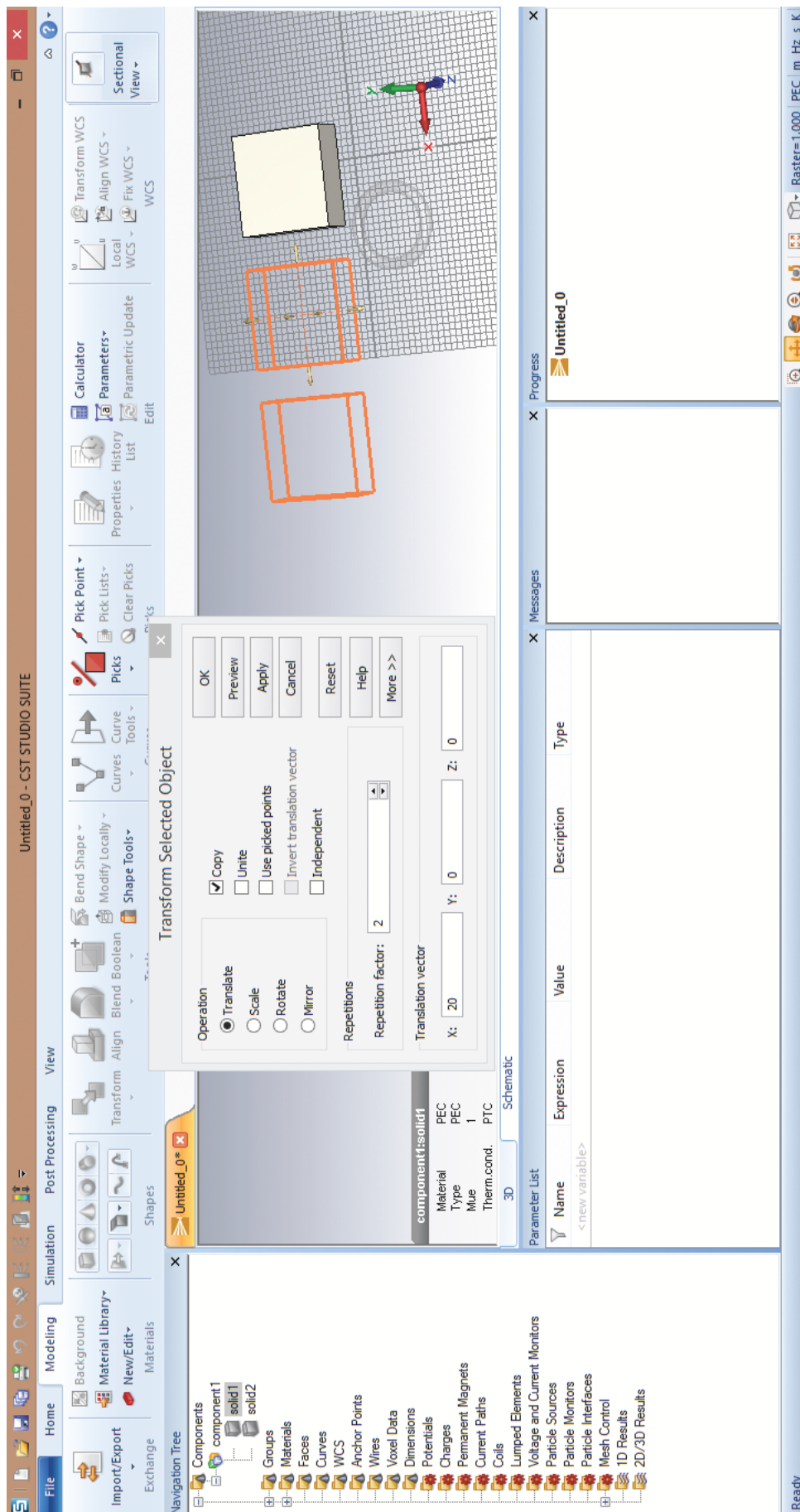


Рис. 3.4: Применение трансформации перемещения с копированием



Рис. 3.5: Результат применения трансформации перемещения с копированием

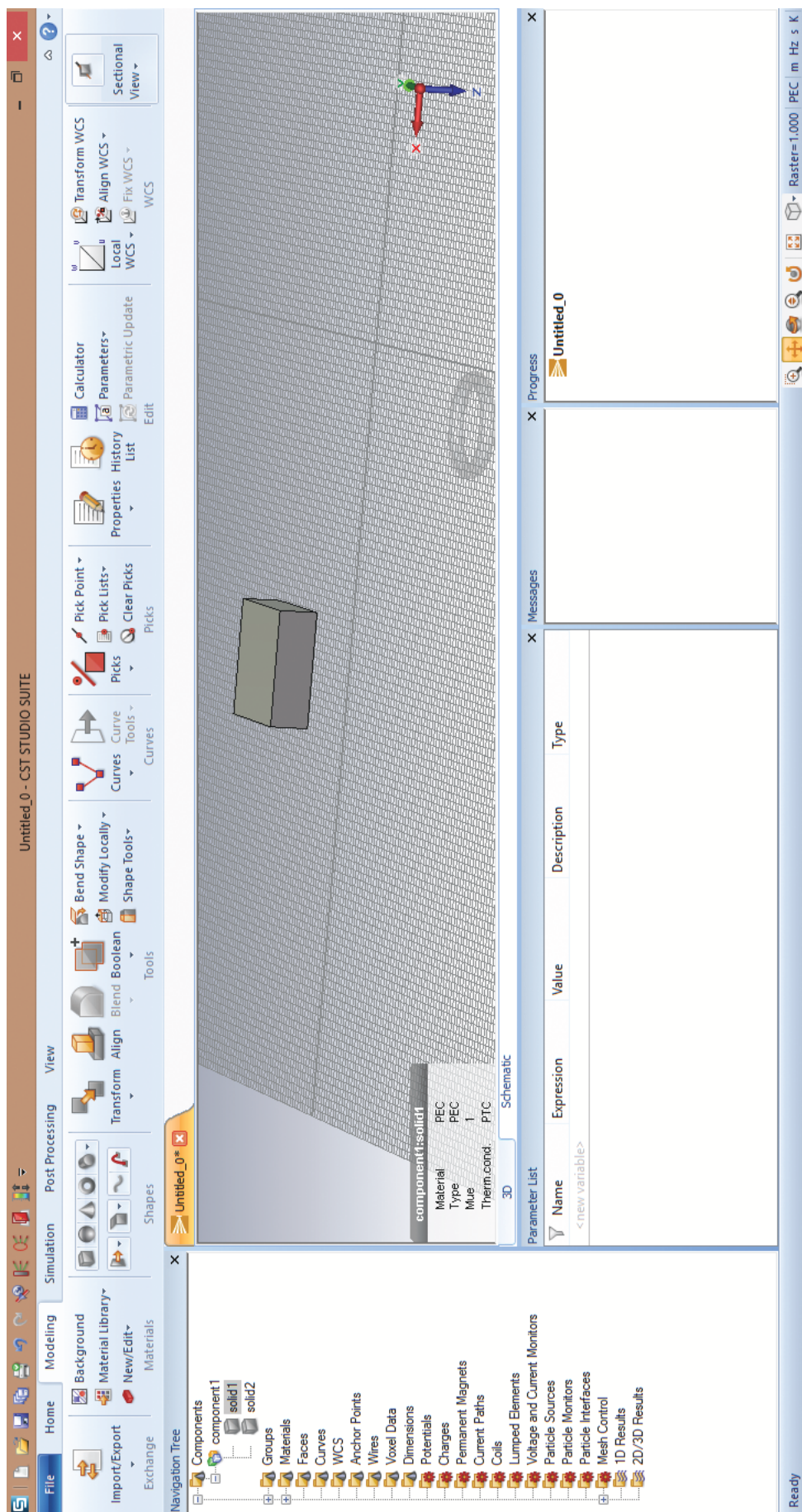


Рис. 3.6: Результат применения трансформации перемещения без копирования

Теперь в меню выбора трансформаций выберем масштабирование (Scale). Окно с заданием настроек данной трансформации объекта выглядит несколько иначе (рис. 3.7). Здесь также присутствует возможность копирования исходного объекта, как и в случае трансформации перемещения. Главное отличие заключается в том, что масштабирование объекта можно выполнить как равномерно по всем направлениям (однородное масштабирование), так и неравномерно, когда для каждой координатной оси (для каждого направления) задается свой коэффициент масштабирования. Переключается данная опция с помощью галочки Scale uniform.

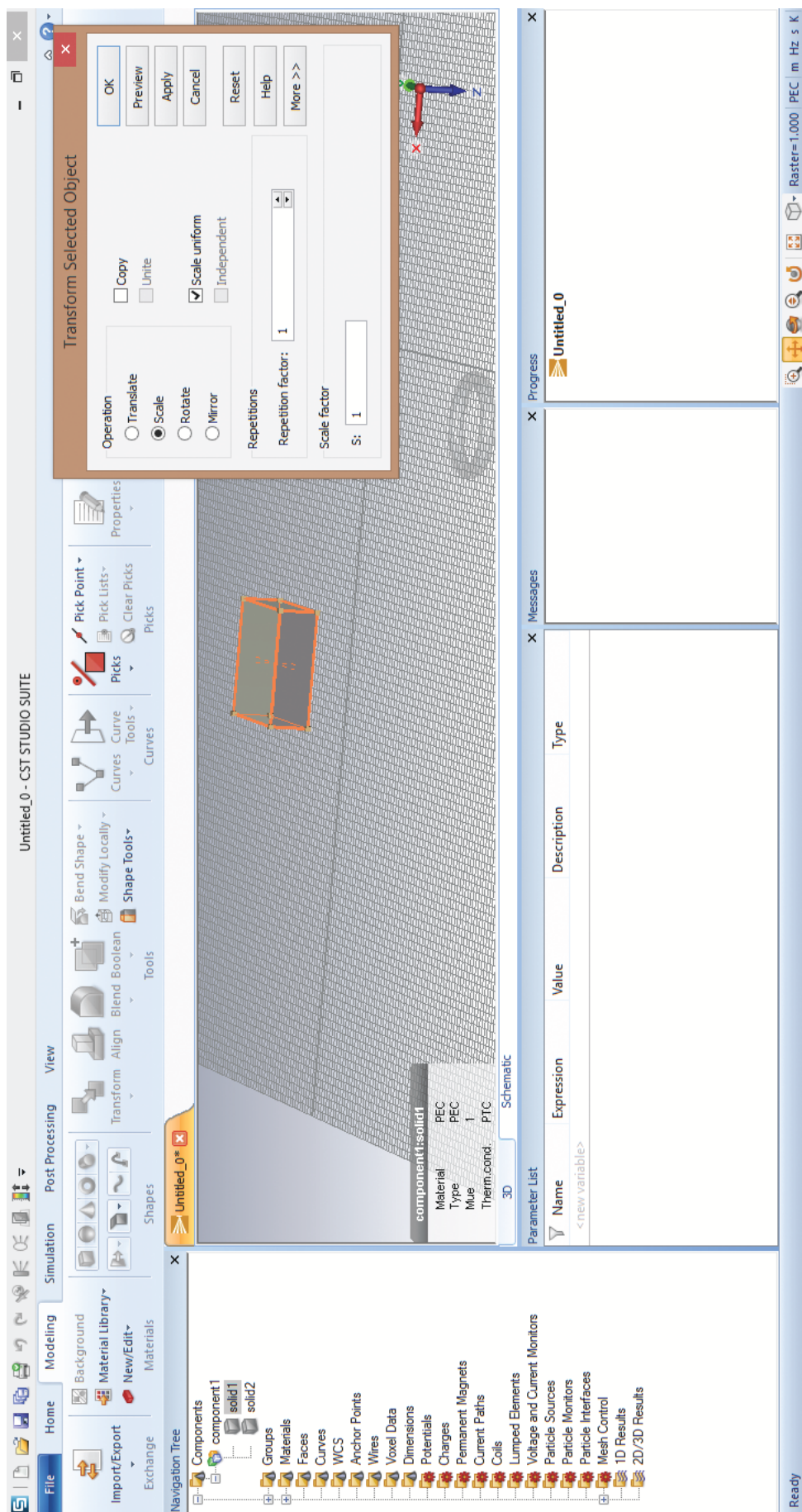


Рис. 3.7: Окно задания настроек масштабирования выбранного объекта

3.4 Использование булевых операций

Наиболее эффективным методом для построения сложных трехмерных структур является комбинирование простых геометрических фигур с помощью булевых (логических) операций. Такие операции позволяют объединять фигуры, вырезать одну или несколько фигур из другой, вставлять их друг в друга или получать пересечения двух или более фигур.

Выбор фигуры для дальнейших операций осуществляется любым из описанных ранее способов.

При помощи команды в главном меню и панели инструментов Modeling | Tools | Boolean осуществляется переход к списку булевых операций. Рассмотрим подробнее назначение и свойства каждой операции:

- Add (объединение, сложение). Вторая фигура объединяется с первой; полученная фигура будет обладать свойствами материала первой фигуры и принадлежать её компоненту в дереве проекта.
- Subtract (вычитание). Вторая фигура вычитается из первой, полученная фигура будет обладать свойствами материала первой фигуры и принадлежать её компоненту в дереве проекта.
- Intersect (пересечение, умножение). Ищется пересечение второй и первой фигур; полученная фигура будет обладать свойствами материала первой фигуры и принадлежать её компоненту в дереве проекта.
- Insert (вставка). Вторая фигура вставляется в первую. Сохраняются оригинальные свойства обеих фигур (изменяются границы только первой фигуры).

Также при создании фигуры, пересекающей уже существующую, появляется окно, предлагающее применить или не применять (пункт None) к данным фигурам возможные булевы операции.

3.5 История модификаций проекта и свойства объектов

В процессе разработки 3D-структур в среде CST Particle Studio часто возникает необходимость исправлять ошибки, допущенные во время создания модели. Это легко сделать, выполнив отмену предыдущей операции или нескольких операций с помощью стандартной комбинации горячих клавиш Ctrl+Z. Тем не менее, часто возникает необходимость вернуться к предыдущему этапу создания модели, чтобы изменить параметры и свойства конкретного объекта, не изменяя систему в целом.

Программа CST позволяет просматривать и редактировать историю модификаций проекта с помощью инструмента History List, который располагается на панели инструментов: Modeling | Edit | History list. Рассмотрим подробнее окно истории проекта (рис. 3.8).

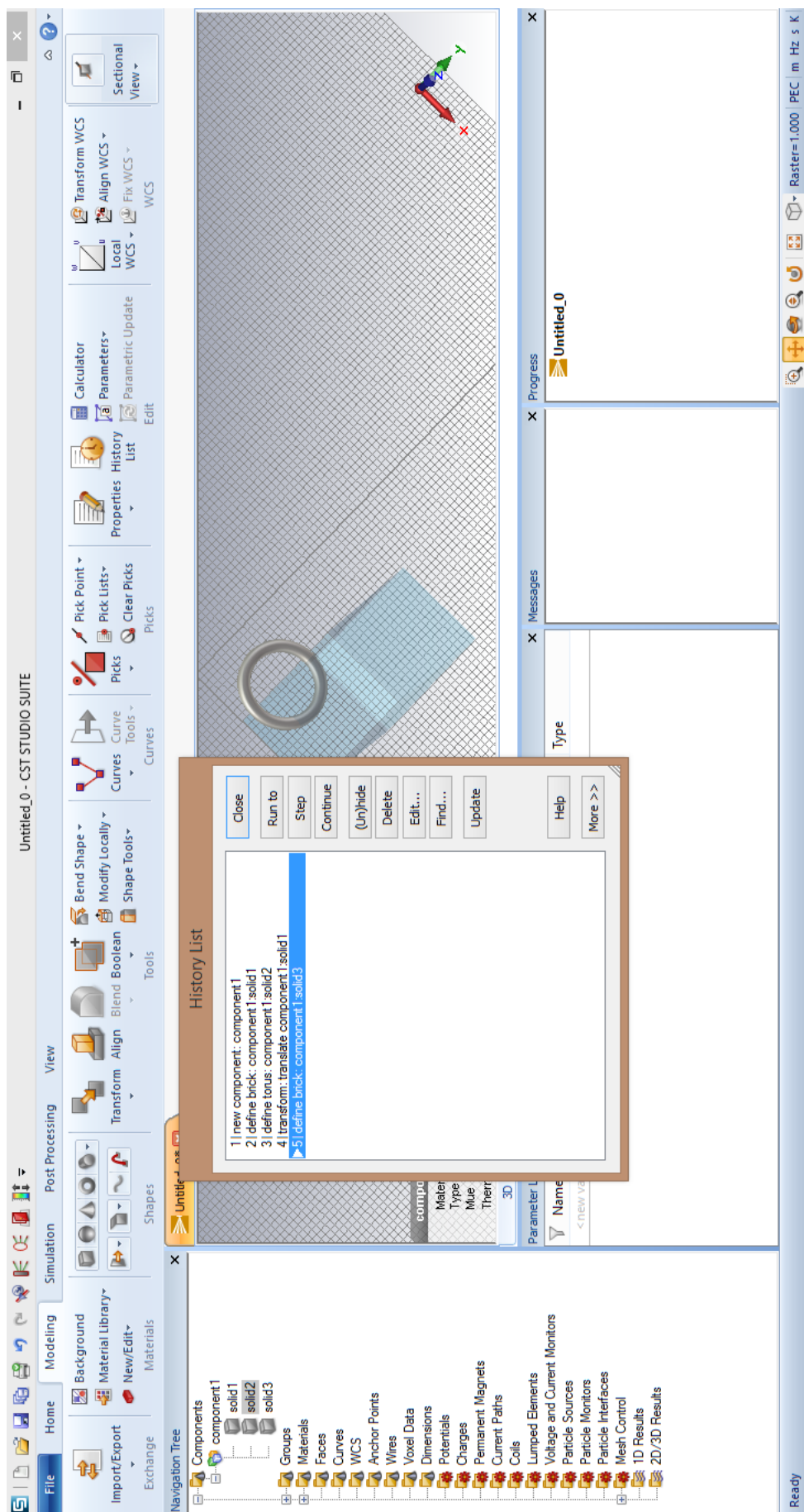


Рис. 3.8: Вид инструмента History List

В левой колонке окна находится пронумерованный список всех действия пользователя, а в правой — кнопки управления. Для перехода к определенному этапу создания модели в проекте необходимо выбрать соответствующее действие в левой колонке окна, после чего появится окно с программным кодом данного действия или установленные пользователем характеристики объекта (рис. 3.9).

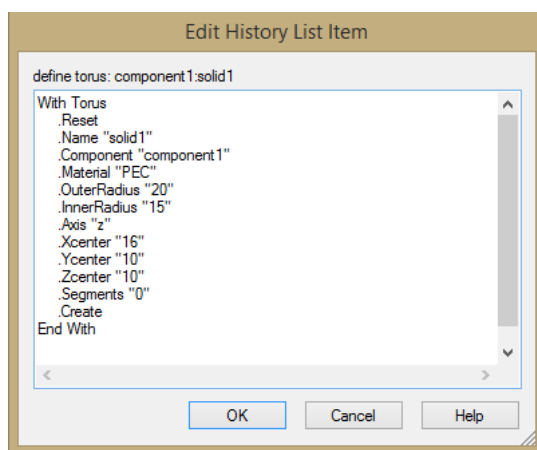


Рис. 3.9: Окно с программным кодом действия

Изменив первоначальные параметры размеров и материала объекта, в окне, изображенном на рисунке 3.10 нажмем Ok. При закрытии окна меню History List появится предупреждение о внесенных изменениях. При выборе в меню Ok, в соответствии с установленными параметрами, получим элемент, изображенный на рисунке 3.11.

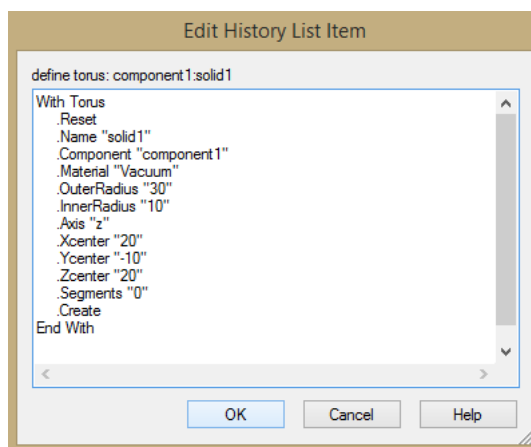


Рис. 3.10: Новые характеристики в коде



Рис. 3.11: Элемент, полученный с помощью изменения кода

Код достаточно прост, в него можно вносить соответствующие изменения. В случае недопустимой команды в коде программа выдаст сообщение об ошибке.

Чтобы перейти к действию программы, совершенному ранее, в левой колонке нужно выбрать соответствующее действие, а в правой нажать кнопку Run To. После этого программа вернется к соответствующему моменту в истории проекта, а действия, совершенные после выбранного, останутся в истории проекта, но не будут активированы.

Чтобы удалить действие в истории проекта, нужно выбрать соответствующее действие в списке истории и кликнуть кнопку Delete в правой части окна. Пункты из истории следует удалять с осторожностью, так как с выбранным действием могут быть связаны другие команды, выполненные в истории проекта позднее. Удаление одной команды в истории может привести к сложно устранимым последствиям для дальнейшего моделирования, и в таком случае проект придется создавать и проектировать заново.

Изменить свойства объекта также можно, используя панель инструментов: Modeling | Edit | Properties, после выбора соответствующего объекта. Альтернативный вариант — использование комбинации горячих клавиш Ctrl+E. Также вызов окна свойств объекта происходит с помощью щелчка правой кнопкой мыши при наведении на объект или двойного щелчка левой кнопки мыши при выбранном объекте в дереве проекта.

В появившемся диалоговом окне (рис. 3.12) описывается процесс создания выделенной фигуры. При выборе определенного действия в этом окне осуществляется переход к редактированию заданных ранее параметров, что удобно использовать для изменения свойств объекта.

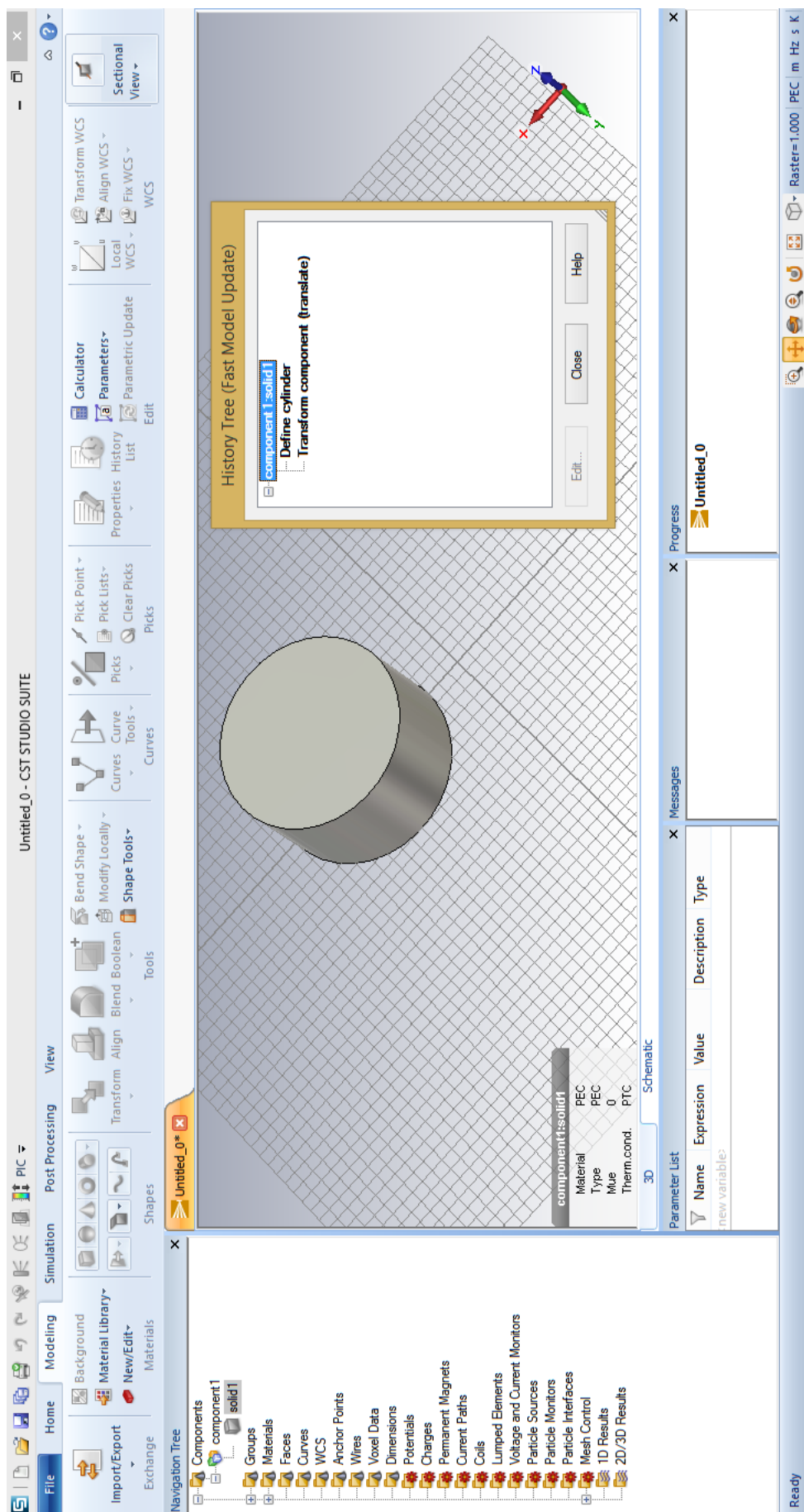


Рис. 3.12: Вид инструмента Properties

Глава 4

Моделирование рабочего процесса в среде CST Particle Studio

Важным этапом в постановке численного моделирования в программе CST STUDIO SUITE является создание условий, необходимых для запуска рабочего процесса. В этой главе мы рассмотрим инструменты, позволяющие спланировать ход численного моделирования в программе, задать источники и выводы энергии.

В данном учебно-методическом пособии будет рассматриваться PIC-солвер (модуль Particle-in-Cell), предназначенный для самосогласованного моделирования динамики электронных потоков в собственных и возбуждаемых в электродинамических структурах электромагнитных полях. Подчеркнем, что возможности PIC-вычислителя позволяют выполнять моделирование динамики электронного пучка с учетом его собственных полей, что делает данный инструмент незаменимым для анализа мощных СВЧ приборов (магнетронов, гиротронов, клистронов, ламп бегущей волны, виркаторов и др.).

Выбрать режим вычислителя Particle-in-Cell можно в главном меню проекта: Home | Simulation | Problem Type | Particle | PIC.

4.1 Инструмент создания и настройки рабочей сетки

Для создания и модификации рабочей расчетной сетки существует специальный инструмент — Mesh. Расчетная сетка представляет собой важный элемент процесса моделирования, так как в соответствии с разбиением про-

странства моделирования на ячейки в узлах сетки осуществляется расчет электромагнитных полей и взвешивание зарядов и скоростей частиц.

Ознакомимся с процедурой создания рабочей сетки Mesh для проектируемых объектов в окне моделирования. Для уже созданной системы объектов зададим параметры рабочей сетки, перейдя в главном меню в следующий раздел: Simulation | Mesh | Global Properties. Заметим, что точность и продолжительность вычислений непосредственно зависят от выбора параметров рабочей сетки: чем меньше ячейки сетки, тем точнее результаты, но тем больше потребуется машинного времени для проведения необходимых расчетов. Шаг моделирования по времени выбирается программой автоматически в соответствии с сеточным разбиением, исходя из условия устойчивости конечно-разностной схемы — критерия Куранта-Фридрихса-Леви.

В окне задания параметров рабочей сетки можно принять параметры по умолчанию или самостоятельно выбрать необходимый для моделирования процесса масштаб. Для наглядного представления установленных параметров сетки в панели управления существует кнопка Mesh View: Simulation | Mesh | Mesh View. Также перейти к виду сеточного разбиения объектов можно, используя дерево проекта, кликнув на узел Mesh Control. Для отключения вида рабочей сетки в панели управления находится кнопка Close Mesh Control.

Удобно также использовать вид объекта в некотором сечении в режиме просмотра параметров сетки. После нажатия Mesh View в панели инструментов в левом верхнем углу появляется пункт Sectional View, в котором надо выбрать кнопку Cutting Plane для просмотра сечения объекта в режиме сетки. Для отключения данного режима также используется кнопка Cutting Plane.



Рис. 4.1: Рабочая сетка и её параметры

Также вид объектов в сечении можно использовать и в обычном режиме построения фигур, что позволяет получать наглядные картины создаваемого в среде моделирования объекта. Для этого в главном меню в пункте Modeling нужно выбрать Sectional View, куда встроена функция Cutting Plane.

4.2 Инструмент моделирования эмиссии частиц

Как уже отмечалось выше, возможности среды CST Particle Studio позволяют моделировать поток заряженных частиц и анализировать его динамику в электромагнитных полях. Для этого необходимо задать источник пучка, который эмитирует в систему заряженные частицы. В CST Particle Studio установить источник заряженных частиц позволяет инструмент Particle Source: Simulation | Sources and Loads | Particle Source. После перехода к нему в выпадающем меню следует выбрать один из четырех видов источника частиц:

- эмиссия с поверхности,
- точечный эмиттер,
- импортируемый источник,
- кольцевая эмиссия.

Часто эффективно использовать в качестве источника заряженных частиц при моделировании инжекции электронного пучка *эмиссию с поверхности*. Для удобства выбора поверхности для установки источника заряженных частиц можно скрывать объекты, которые перекрывают доступ к нужной поверхности, с помощью горячих клавиш Ctrl+N. Напомним, что обратная процедура для показа скрытых фигур — Ctrl+U.

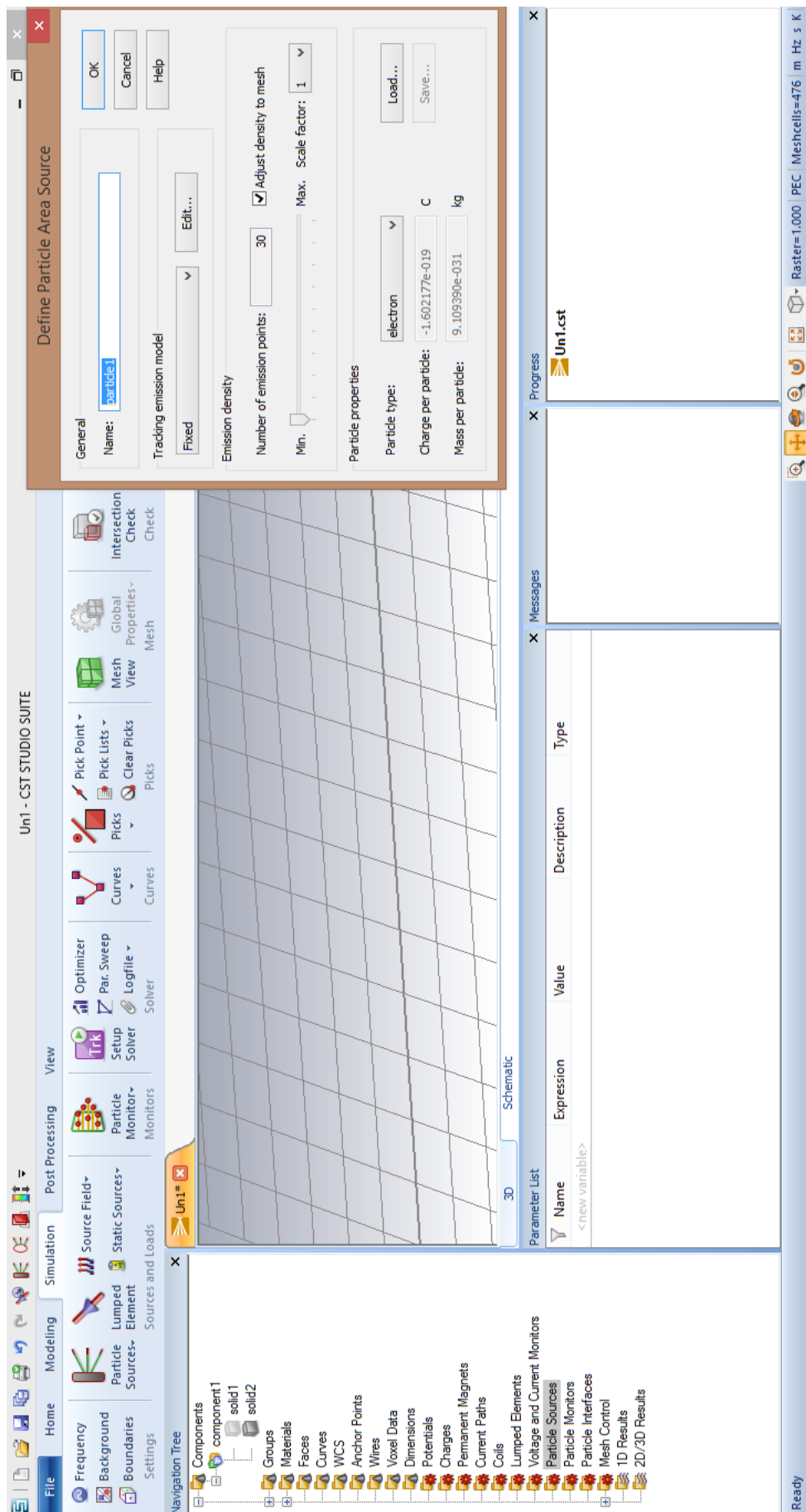


Рис. 4.2: Окно настроек инструмента Particle Source

Выберем в выпадающем меню пункт Particle Area Source и рассмотрим предлагаемые настройки для этого вида источника. После выбора пункта Particle Area Source программа предложит задать поверхность для установки источника заряженных частиц. Выбор поверхности или снятие осуществляется двойным кликом левой кнопки мыши. Можно выбрать одну или несколько поверхностей, после чего для подтверждения и перехода к детальным настройкам следует нажать клавишу Enter. Для отмены выбора поверхности следует нажать Esc.

После выбора поверхности осуществляется настройка параметров источника заряженных частиц. Появившееся окно (рис. 4.2) позволяет установить в разделе Emission density число испускаемых каждый временной шаг частиц и привязать их количество к рабочей сетке, что упрощает задание оптимального значения. Чем больше количество частиц, тем точнее описывается динамика пучка, и тем больше машинного времени потребуется программе для проведения численных расчетов.

Раздел настроек PIC emission model позволяет задать тип модели эмиссии. Всего предлагается 4 различных типа эмиссии частиц: гауссова (Gauss), постоянная (DC), автоэмиссия (Field), взрывная (Explosive). Так, модель эмиссии DC emission предоставляет широкие возможности для задач электроники, при численном решении которых используется вычислитель Particle-In-Cell. Данная модель реализует инжекцию в систему потока электронов с заданными величинами напряжения и тока. Также в разделе окна Particle properties можно выбрать тип испускаемых частиц (электроны, альфа-частицы) или задать их параметры вручную.

После установки необходимых настроек в окне (рис. 4.2) нажмите кнопку Ok — в дереве проекта в узле Particle Sources появится информация о созданном источнике заряженных частиц. После перехода к источнику частиц через дерево проекта информация о нём появляется в окне в плоскости моделирования.

4.3 Инструмент Ports для задания портов — активных и пассивных элементов модели

Инструмент Ports в программе CST Particle Studio служит, в частности, для запитывания системы энергией. Он, например, с большой точностью моделирует процесс подачи напряжения на диод.

Компоненты Ports автоматически появляются в режиме моделирования PIC-процессов в панели инструментов Modeling | Particles and Sources. При работе в других режимах при необходимости можно разместить команду создания порта в главном окне с помощью настройки панели быстрого доступа.

Основных компонентов инструмента Ports в программе два: Discrete Port и Waveguide Port. Первый служит для подачи напряжения или тока к объекту. Второй моделирует ввод/вывод электромагнитных полей в системе с помощью идеально согласованного бесконечно длинного волновода заданной конфигурации.

Для подключения компонента инструмента Discrete Port к объекту в панели инструментов выберем пункт Discrete Port, после чего появится окно (рис. 4.3), в котором предлагается задать координаты начала и конца объекта Discrete Port. Также, используя возможности выбора элементов фигур Picks, можно определить координаты для объекта Discrete Port, задав точки, между которыми прикладывается напряжения. Также в окне (рис. 4.3) в разделе Properties нужно задать величину напряжения или тока, или значение S-параметра. Радиус элемента указывать не обязательно, если рассматривается случай подачи питания через идеальный проводник.

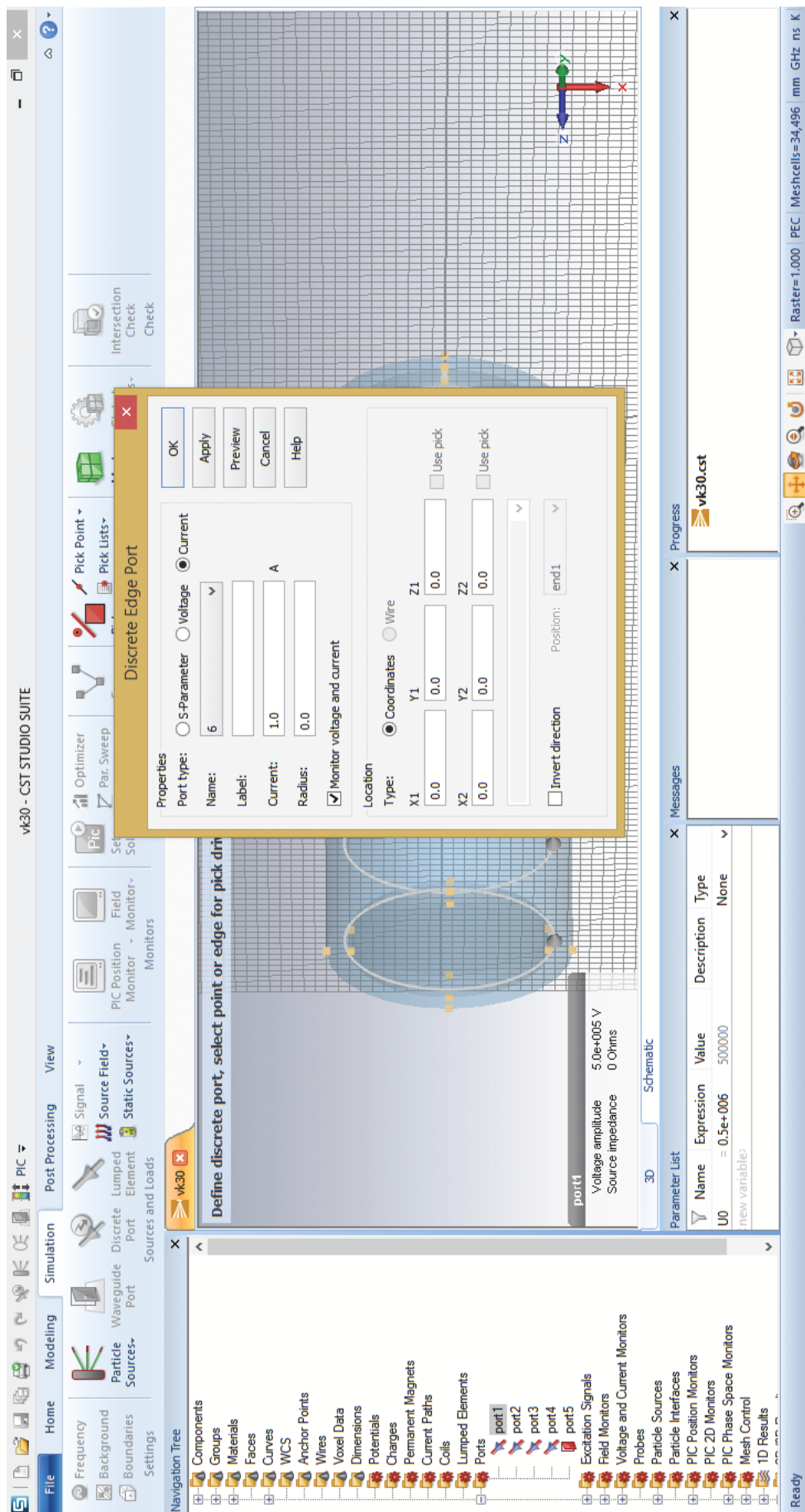


Рис. 4.3: Окно настройки инструмента Ports

Для описания подачи напряжения или тока с помощью Discrete Port важно указать параметры функции, которые будут описывать форму подаваемого сигнала (Excitation Signals). Компоненты меню Excitation Signals автоматически появляются в режиме моделирования PIC-процессов в панели инструментов. Переход осуществляется с помощью перехода в панели инструментов Simulation | Sources and Loads. Компонент Signals позволяет задать параметры сигнала: его тип (пороговый, периодический), временной интервал и др. В дальнейшем, перед запуском процесса моделирования, следует связать заданный сигнал с установленными в системе компонентами Discrete Port, что делается в настройке Excitation List PIC-солвера перед его запуском.

При использовании Waveguide Port система моделирует бесконечно длинный идеально согласованный волновод (для ввода или вывода электромагнитной энергии из системы), форма которого в поперечном сечении определяется выбранным сечением модели. При необходимости можно задать параметры порта непосредственно вручную, сняв в окне пометку о привязке порта к объекту. После чего в появившемся окне (рис. 4.4) остается установить нормаль и ориентацию для объекта Waveguide Port, установить число учитываемых мод в порту (в пункте Number of modes), по которым будет производиться подсчет получаемых сигналов в системе. После задания настроек элементы инструмента Ports также появятся в дереве проекта, в папке Ports.

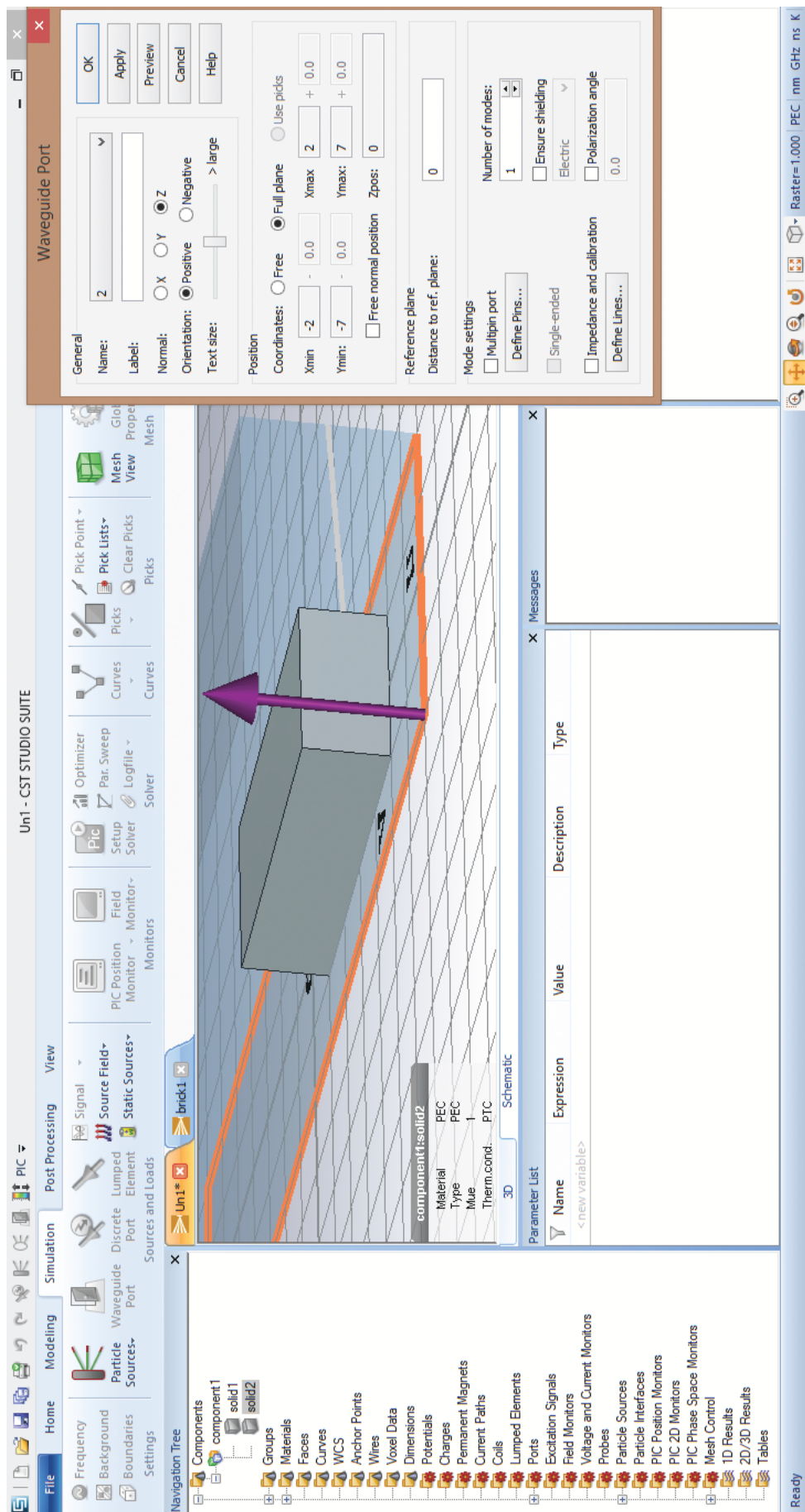


Рис. 4.4: Окно настройки инструмента Waveguide Ports

4.4 Задание дополнительных параметров рабочего процесса

В панели Simulation | Sources and Loads, пройдя в меню Static Sources, можно придать выбранному объекту свойства магнита или задать для него некоторый электростатический заряд. Пройдя в меню Source Field, можно задать электрические и/или магнитные поля в системе, с которыми взаимодействуют частицы. Инструмент Analytic Source Field позволяет задать вектор напряженности или индукции магнитного поля в системе; разложение по базису вектора указывается в соответствующем окне (рис. 4.5), которое появляется при нажатии выбранного объекта в панели инструментов. Можно также задать магнитное поле с помощью описания одномерного распределения на оси: Type | 1D Description.

В панели инструментов Simulation в верхнем крайне левом положении находится значок с пометкой Frequency. Кликнув на значок, мы увидим параметры ограничения расчетного частотного диапазона; по умолчанию верхнее и нижнее значения установлены на нулевом значении частоты. Для получения корректных результатов необходимо задать правильный частотный диапазон, покрывающий частотные масштабы происходящих в системе процессов, представляющих интерес.

Окончательной частью подготовки моделирования процессов в исследуемой системе является установка параметров солвера (Simulation | Solver | Setup Solver). В первую очередь, в выпадающем меню предлагается выбрать тип солвера; выбор зависит от конкретной решаемой задачи. Каждый солвер имеет свой алгоритм для постановки и решения задачи. В независимости от типа солвера пользователю всегда предлагается построить геометрическую модель системы, задать время моделирования процесса, значения скалярных и векторных характеристик системы, определяющих начальные условия численной модели.

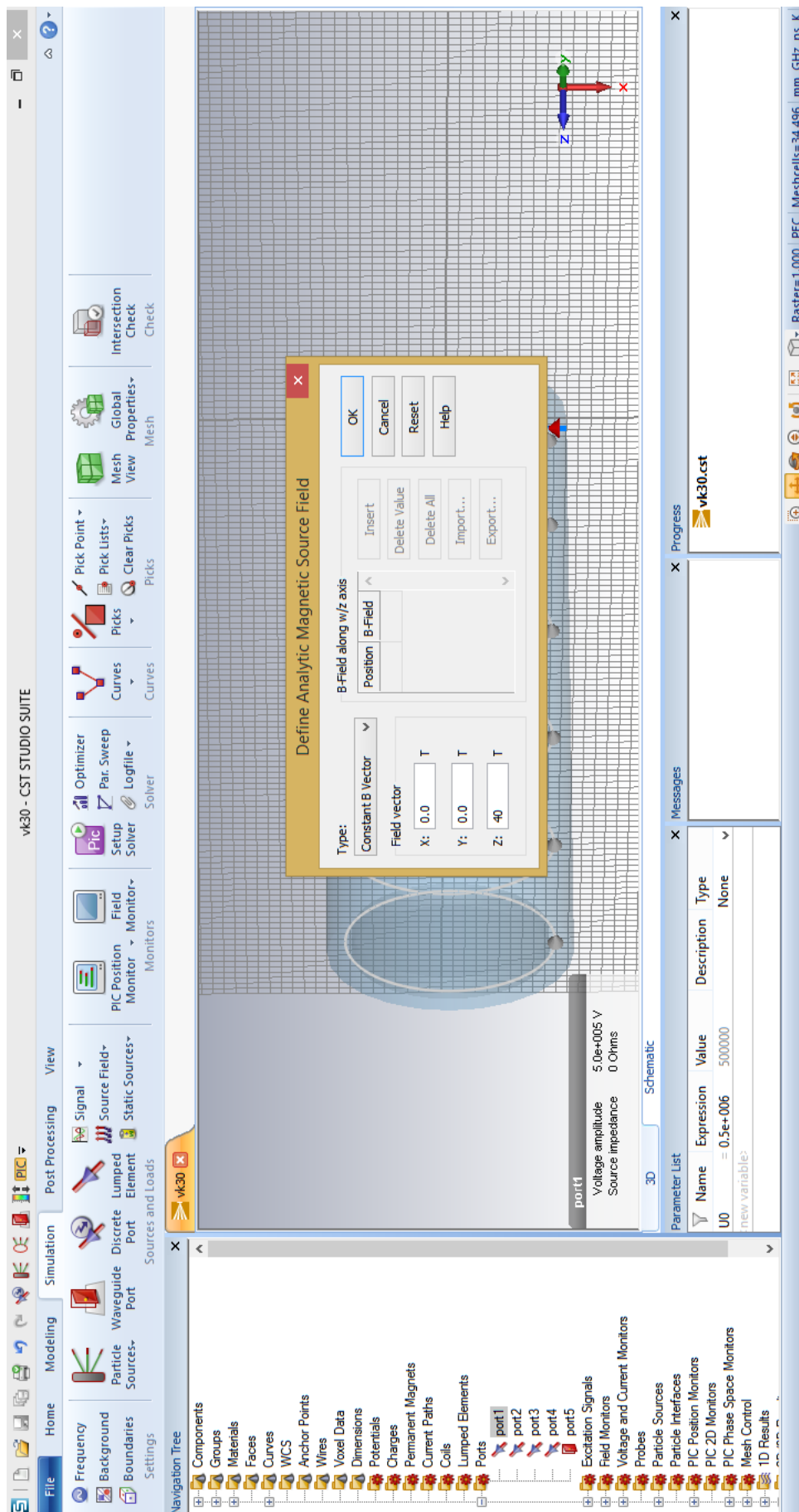


Рис. 4.5: Окно задания параметров магнитного поля

Глава 5

Постобработка и оформление результатов исследования

5.1 Использование шаблонов постобработки

В процессе работы программа анализирует данные, полученные в результате численного моделирования. По этим данным программа строит графики и распределения полученных реализаций конкретной физической величины в системе. Все результаты отображаются в папках 1D results и 2D/3D results в дереве проекта. Они непрерывно обновляются и в большинстве своем доступны в реальном времени в ходе процесса численного моделирования. Часть результатов появляется только по завершении процесса моделирования.

На основе полученных данных с помощью шаблонов постобработки обеспечиваются гибкие возможности по оформлению и обработке результатов моделирования для трех- и двухмерного отображений полей, построению одномерных графиков (1D) и получению отдельных скалярных значений (0D). Все полученные значения сохраняются в таблице в окне шаблона постобработки, что обеспечивает быстрый доступ к данным.

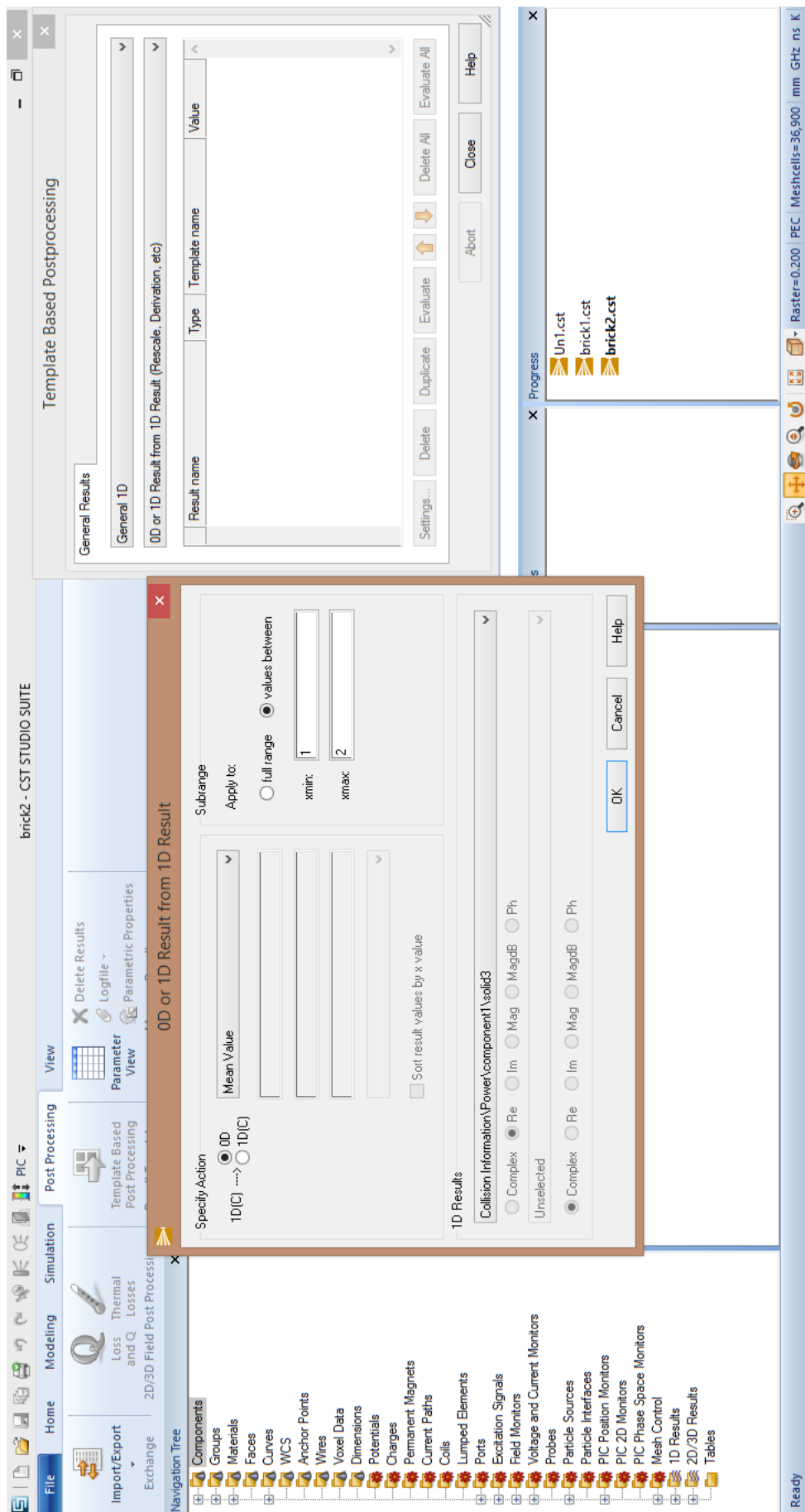


Рис. 5.1: Пример использования шаблона постобработки

Рассмотрим возможности шаблонов постобработки на примере получения скалярных значений (0D) для уже посчитанных результатов проекта.

Для открытия шаблона перейдем в панели инструментов в раздел Post Processing, выберем пункт Template Based Post Processing. После чего откроется окно шаблонов постобработки — Template Based Post Processing. В этом окне следует выбрать тип обрабатываемой и получаемой информации. Пример настроек указан на рисунке 5.1.

После указания типа обрабатываемой информации открывается дополнительное окно (рис. 5.1). В этом окне, выбрав, например, пункт скалярного получаемого значения (0D), следует также выбрать объект, содержащий 1D данные, полученные в результате численного моделирования, задать временной интервал и функцию, применяемую к исходным данным, результат выполнения которой отобразится в шаблоне постобработки после подсчета. Для получения значений в окне шаблона постобработки следует нажать кнопку Evaluate. В течении нескольких секунд полученный результат появится в таблице окна шаблона постобработки (рис. 5.2).



Рис. 5.2: Полученное значение в шаблоне постобработки

5.2 Использование дополнительных возможностей

Для отслеживания движения частиц при использовании PIC-солвера перед запуском процесса следует установить монитор PIC position monitor. Переход к нему осуществляется с помощью команд в панели инструментов Simulation | Monitors | PIC position monitor. После его выбора появится окно с заданием параметра временного шага протоколирования координат и скоростей частиц в системе, начального и конечного времени работы монитора.

После окончания численного моделирования “снимки” частиц в системе в фиксированные моменты времени, определяемые настройками монитора, сохраняются в дереве проекта в пункте 2D/3D results | Particles | Position monitors. После перехода в пункт Position monitors в левом углу панели инструментов выберем пункт Properties. Появившееся окно позволяет запустить анимацию, выбрать отображаемые физические величины, ассоциируемые с частицами, задать цветовую гамму.

Результаты расчетов, а также значения, полученные в ходе использования шаблонов постобработки, дальше можно как обрабатывать и визуализировать графически в программной оболочке CST PS, так и экспортировать для дальнейшей обработки во внешних программах, при этом возможен экспорт как в виде графических файлов, так и файлов с данными.

Глава 6

Постановка и решение задач в модуле программы CST Particle Studio

В данной главе методического пособия будет детально разобран каждый этап в планировании и постановке численного моделирования в PIC-солвере программы CST Particle Studio. Для рассмотрения процесса и получения численных результатов желательно придерживаться следующей последовательности действий:

1. Рассмотрение физической теории исследуемой проблемы.
2. Планирование постановки численного моделирования.
3. Разработка моделей объектов системы.
4. Задание размерностей, начальных и граничных условий в системе.
5. Запуск численного моделирования.
6. Сбор и анализ полученных численных значений.
7. Оформление результатов.

В качестве примера рассмотрим получение численной зависимости величины анодного тока для диодного промежутка от поданной разности потенциалов между катодом и анодом. Полученные численные результаты сравним с теоретическими (закон степени $3/2$).

6.1 Получение и анализ анодного тока. Качественная оценка закона $3/2$ для релятивистского электронного пучка

6.1.1 Теоретический анализ процессов в диодном промежутке

При достаточно высоких температурах на границе металла и вакуума на катоде возникает явление термоэлектронной эмиссии. С дальнейшим ростом температуры ток эмиссии экспоненциально возрастает по закону Ричардсона–Дешмана.

При подаче на анод лампы положительного (относительно катода) потенциала в межэлектродном пространстве лампы возникает ускоряющее электроны электрическое поле. Можно предположить, что в этом поле все испущенные катодом электроны устремятся к аноду так, что ток анода будет равен току эмиссии.

Однако, это предположение справедливо только в том случае, когда можно пренебречь значением пространственного заряда при относительно низких температурах и малых значениях токов эмиссии.

При больших плотностях тока электронной эмиссии вблизи эмитирующей поверхности возникает объемный отрицательный заряд, определяющий ток пучка, а следовательно, и форму вольт-амперной характеристики диода. Объемный отрицательный заряд препятствует достижению вылетевшим с катода электронам анода. Таким образом, ток анода оказывается меньше, чем ток эмиссии электронов с катода. При увеличении положительного потенциала анода дополнительный потенциальный барьер у катода, создаваемый объемным зарядом, понижается, и анодный ток растет.

Вольт-амперная характеристика с учетом влияния объемного заряда в случае нерелятивистского электронного потока подчиняется степенному закону “трех вторых”. Закон справедлив для диодов с любой конфигурацией катода и анода и для любых температур катода, при которых возможна термоэлектронная эмиссия. Некоторые модификации этого закона имеют место при рассмотрении пучков с большими (релятивистскими) энергиями электронов.

В общем случае закон имеет вид

$$I = gU_a^{3/2}, \quad (6.1)$$

где g — постоянная для данного диода (так называемый первеанс пучка), зависящая от конфигурации и геометрических размеров его электродов. В идеализированном случае первеанс не зависит от тока накала и температуры катода, однако, в реальных лампах он растёт с ростом температуры катода.

6.1.2 Разработка модели диодного промежутка для моделирования процессов динамики пучка в присутствии пространственного заряда

Создадим в CST Particle Studio модель цилиндрического диодного промежутка и зададим условия, приближенные к идеальным для данной задачи.

Для начала работы над данным проектом в главном окне в программе необходимо выбрать соответствующий модуль для решения задачи — CST Particle Studio. После чего следует открыть новый файл проекта, не используя шаблоны данного модуля (Do not use a project template).

В появившемся окне проекта создадим цилиндр. Для этого перейдем к разделу главного меню Modeling, кликнув изображение цилиндра, в появившемся окне зададим ему соответствующие настройки, показанные на рисунке 6.1. Созданный цилиндр будет выполнять роль катода, с которого будут эмитироваться заряженные частицы.

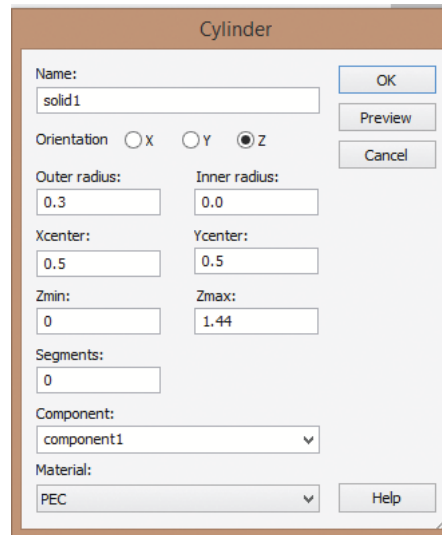


Рис. 6.1: Задание свойств цилиндра (катода) в окне проекта

Похожим образом создадим цилиндр, выполняющий роль пространства дрейфа электронов. Этот объект, в отличие от предыдущего, будет иметь свойства материала Vacuum. Установим параметры цилиндра, указанные на рисунке 6.2.

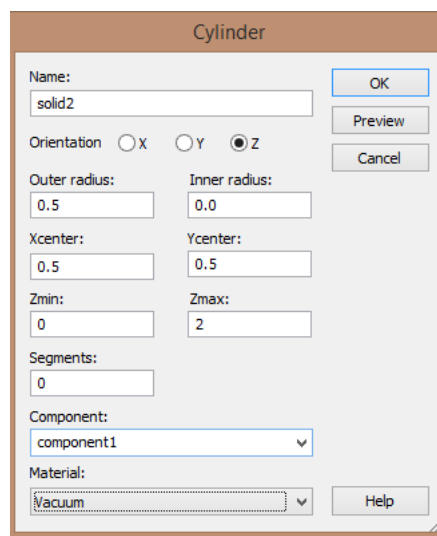


Рис. 6.2: Задание свойств пространства дрейфа электронов

При создании элементов фигур, имеющих общую часть пространства может появиться окно (рис. 6.3), запрашивающее вид логической операции совмещения пересекающихся фигур. В этом окне выберем пункт None (не совмещать).

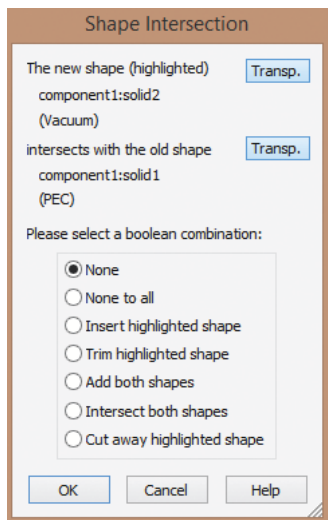


Рис. 6.3: Параметры совмещения фигур

В завершении создания основных объектов установим анод цилиндрической формы с указанными на рисунке 6.4 параметрами, на котором будет оседать электронный поток, эмитируемый с катода, и с которого в дальнейшем будем снимать показания величины тока пучка для измерения вольт-амперной характеристики.

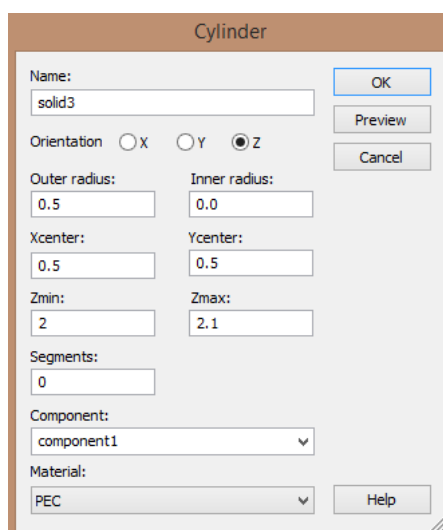


Рис. 6.4: Задание свойств цилиндра, выполняющего роль анода

Установим в качестве внешней среды материал PEC (Perfect Electric Conductor, идеальный проводник), вызвав окно (рис. 6.5) с помощью последовательности команд Simulation | Settings | Background. Таким образом, мы используем особый прием, при котором вырезается полость в металлическом PEC-пространстве. Программа автоматически устанавливает геометрические границы модели и диапазон величин, получаемых в ходе численного моделирования.

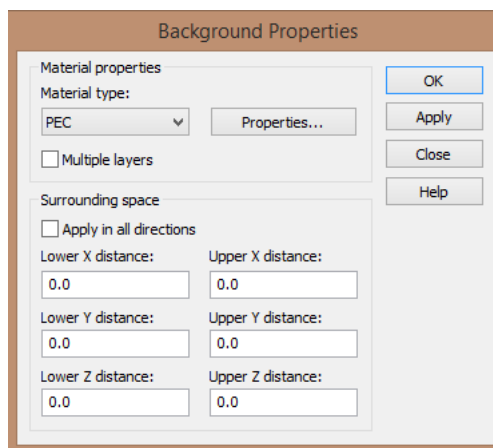


Рис. 6.5: Задание параметров материала внешней среды Background Properties

На рисунке 6.6 представлена готовая модель для реализации поставленной задачи.

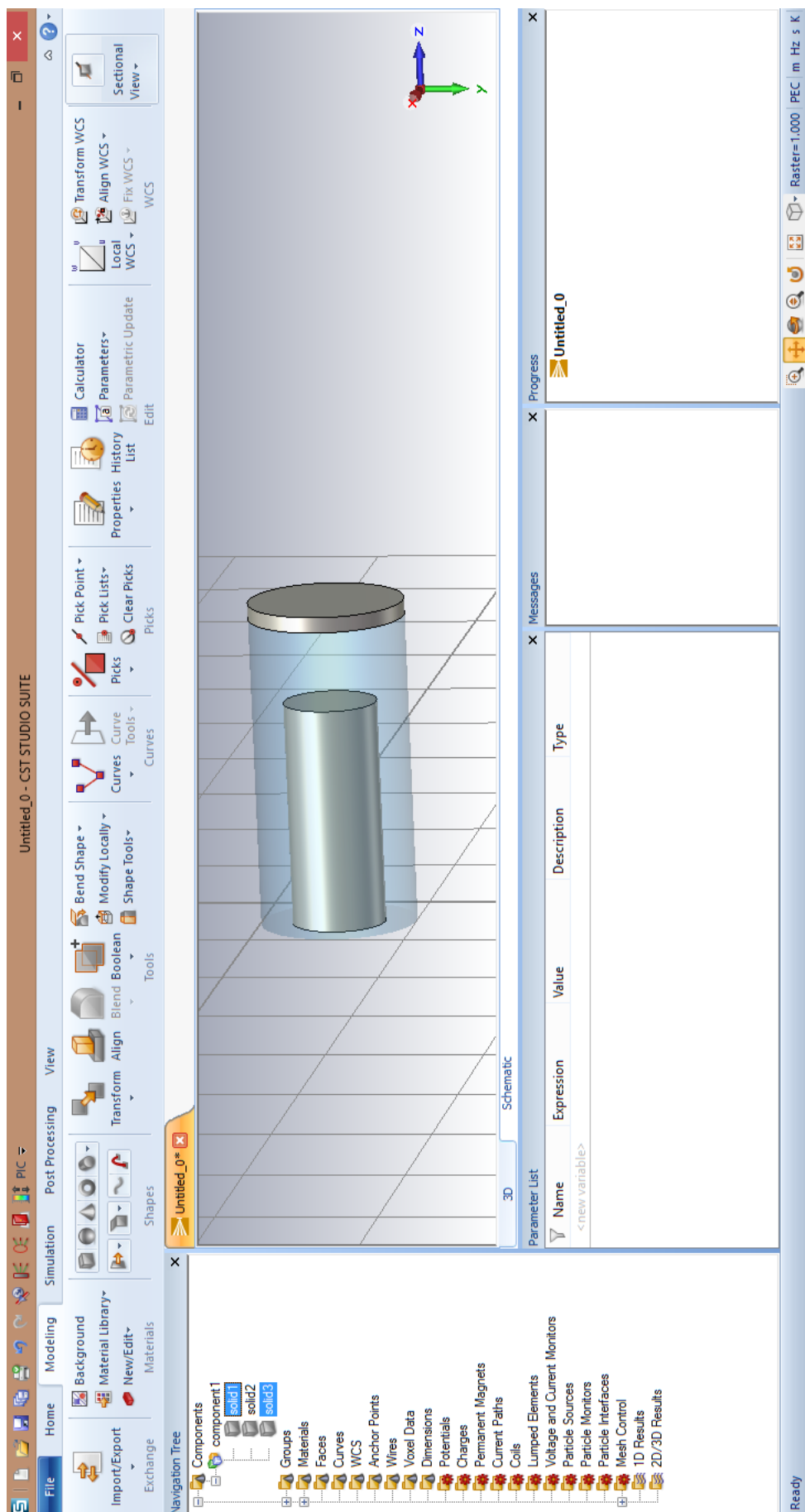


Рис. 6.6: Разработанная модель

Перейдем к заданию размерности рабочего пространства для модели. В качестве основных величин зададим в нижней части окна проекта миллиметры, гигагерцы, наносекунды и кельвины (mm, GHz, ns, K, рис. 6.7). Также следует установить расчетный частотный диапазон от 0 до 2 ГГц. Выбор такого диапазона позволяет корректно рассчитать все характеристики диода.

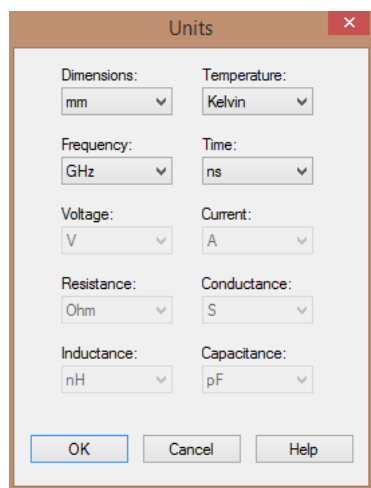


Рис. 6.7: Задание размерности рабочего пространства

В глобальных настройках сетки установим параметры, указанные на рисунке 6.8, которые были подобраны эмпирически и лучше подходят для решения поставленной задачи.

Перейдем теперь непосредственно к режиму PIC-моделирования процессов в диодном промежутке. Солвер PIC выбирается в следующем пункте меню: Home | Simulation | Problem type | Particles | PIC. После этого в панели инструментов появятся необходимые элементы для реализации поставленной задачи.

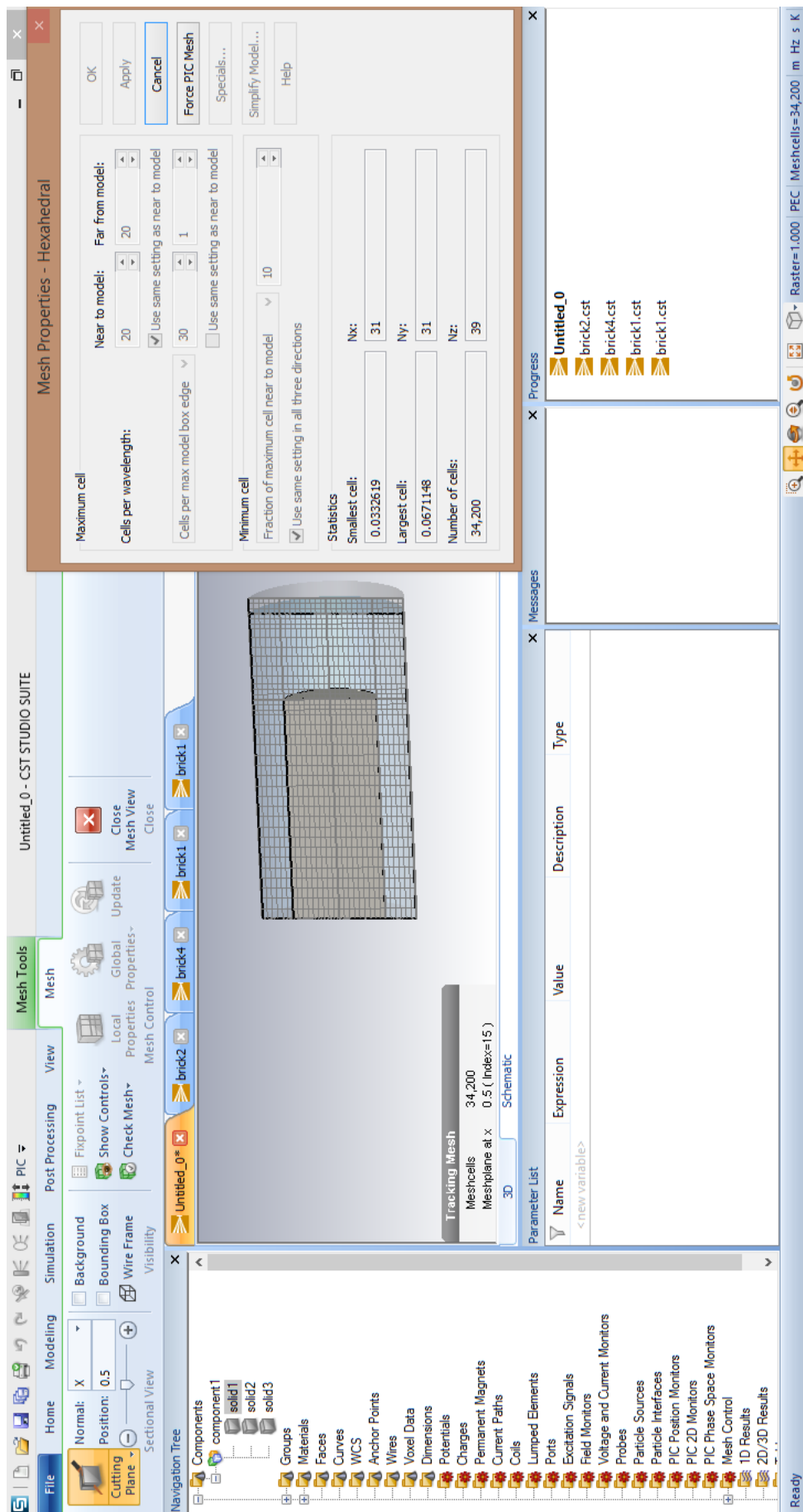


Рис. 6.8: Настройки параметров рабочей сетки

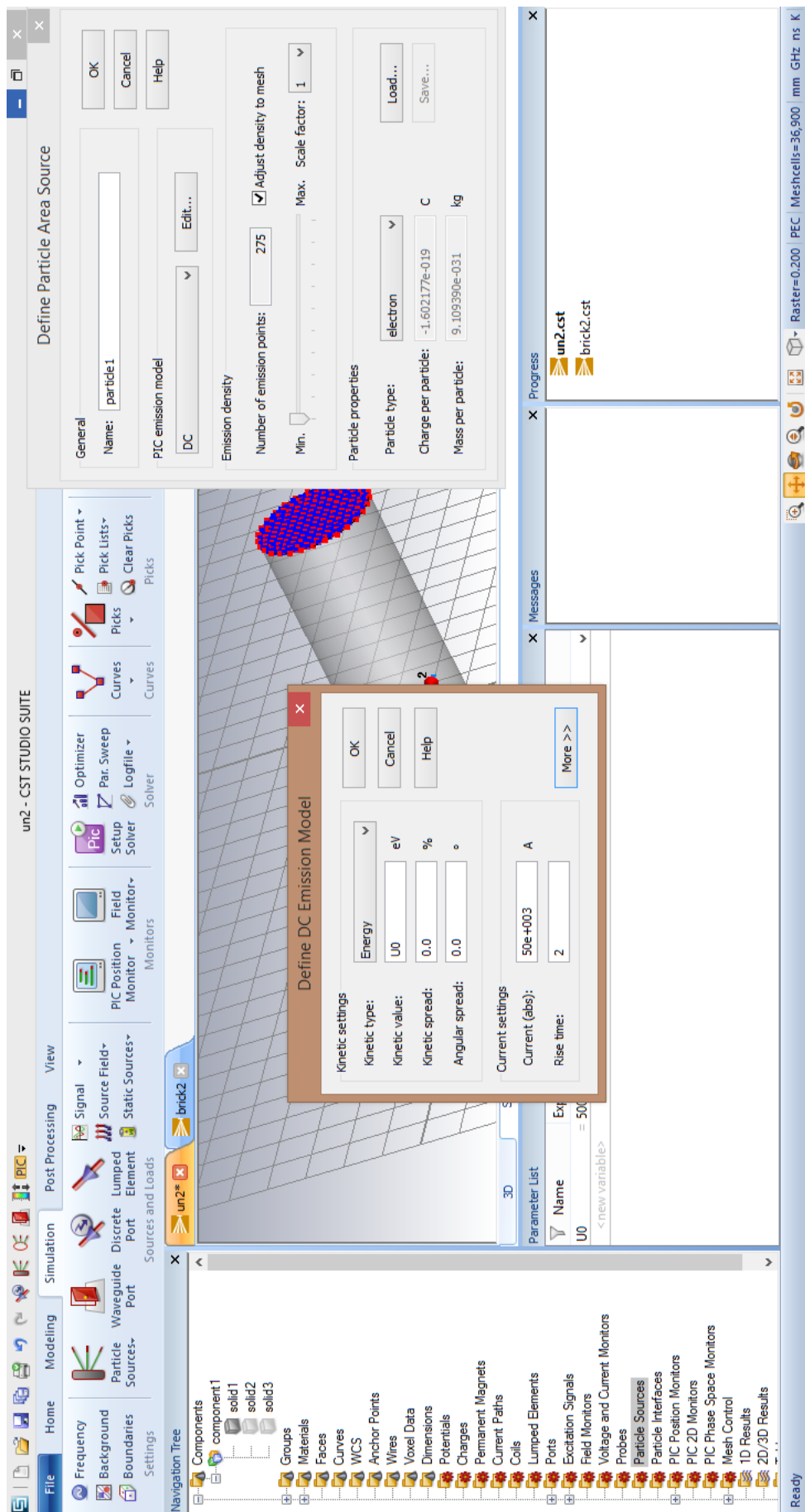


Рис. 6.9: Настройки параметров источника эмиссии частиц

Следующим этапом необходимо установить в системе объект, моделирующий эмиссию частиц с поверхности металла. Для этого используем инструмент Particle Area Source. Для выбора эмитирующей поверхности необходимо выбрать объект, с которого будет происходить эмиссия частиц, остальные объекты следует скрыть, и далее установить настройки моделирования эмиссии. Зададим DC модель эмиссии (эмиссия с постоянными заданными параметрами), наиболее подходящую для рассматриваемой задачи. Установив оптимальные настройки моделирования эмиссии, представленные на рисунке 6.9, перейдем к моделированию разности потенциалов на электродах исследуемого диода.

Установим в модели дискретные порты, подающие ускоряющее напряжение, с указанными на рисунке 6.10 параметрами. Для выбора координат, определяющих положение порта, следует использовать средство выбора элементов-точек на окружности, при этом сначала следует задать точку на внешнем цилиндре, а затем — на внутреннем. После выбора точек можно снять отметку о привязке к указанным координатам и установить высоту с указанной на рисунке 6.10 величиной.

Таким же образом установим ещё три элемента Discrete Port, расположенных под углом 90 градусов друг относительно друга. В результате порты, подающие напряжение в системе, будут расположены, как показано на рис. 6.11. Такая схема питания пушки с использованием 4х портов представляется наиболее эффективной для моделирования без искажений процессов в пушке за счет того, что 4 симметрично расположенных порта не создают аксиально-несимметричные электромагнитные поля, приводящие к существенному искажению траекторий заряженных частиц в пространстве дрейфа.



Рис. 6.10: Создание элемента Discrete Port

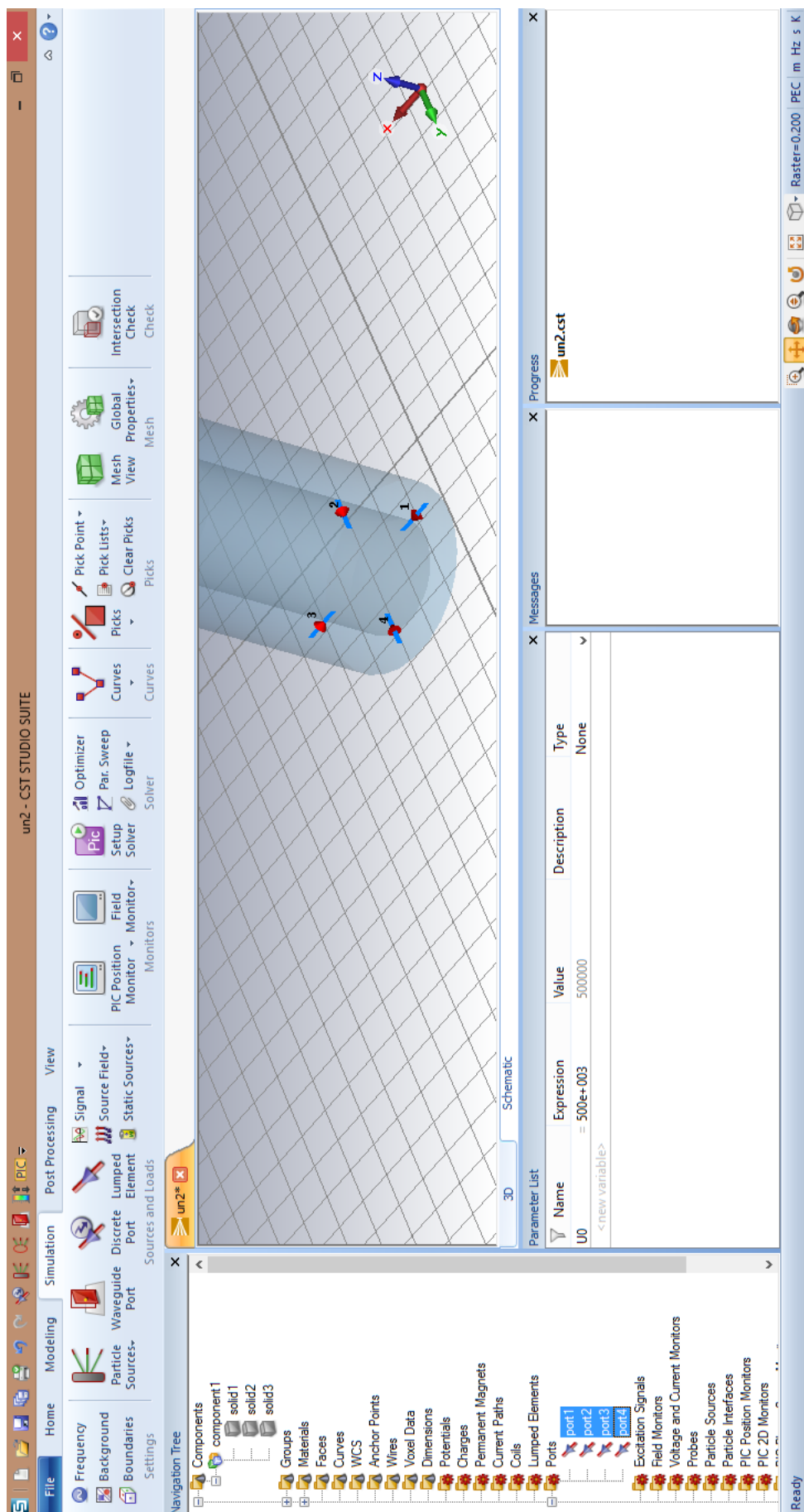


Рис. 6.11: Модель с четырьмя элементами Discrete Ports, используемыми для подачи напряжения

Установим также Waveguide (волноводный) порт с указанным на рисунке 6.12 числом учитываемых мод, по которым в программе будет раскладываться выходной сигнал, получаемый в ходе моделирования процесса.

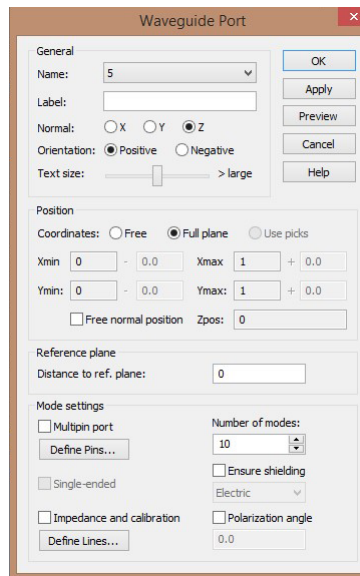


Рис. 6.12: Задание параметров элемента Waveguide Port

Определим также форму подаваемого на дискретный порт сигнала; его параметры показаны на рисунке 6.13.

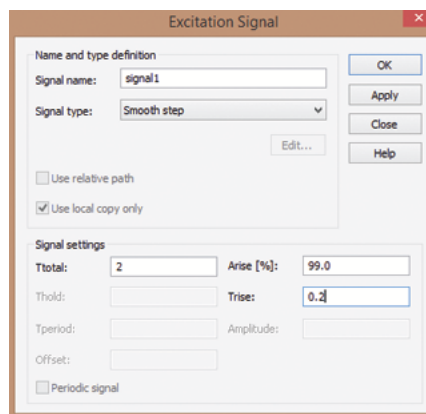


Рис. 6.13: Параметры подаваемого на дискретный порт сигнала напряжения

В завершение создания модели в меню Home выберем пункт Setup Solver, и после появлении окна Particle-in-Cell Solver Parameters установим связь между элементом Discrete Port и сигналом напряжения, зададим время реализации численного моделирования (рис. 6.14). Установив отметку в пункте Analytic Field, зададим параметры вектора магнитной индукции однородного магнитного поля в системе, модуль которого для данной задачи равен 2 Тл, а направление совпадает с осью Z. После нажатия на кнопку Start программа запускает процесс численного моделирования.

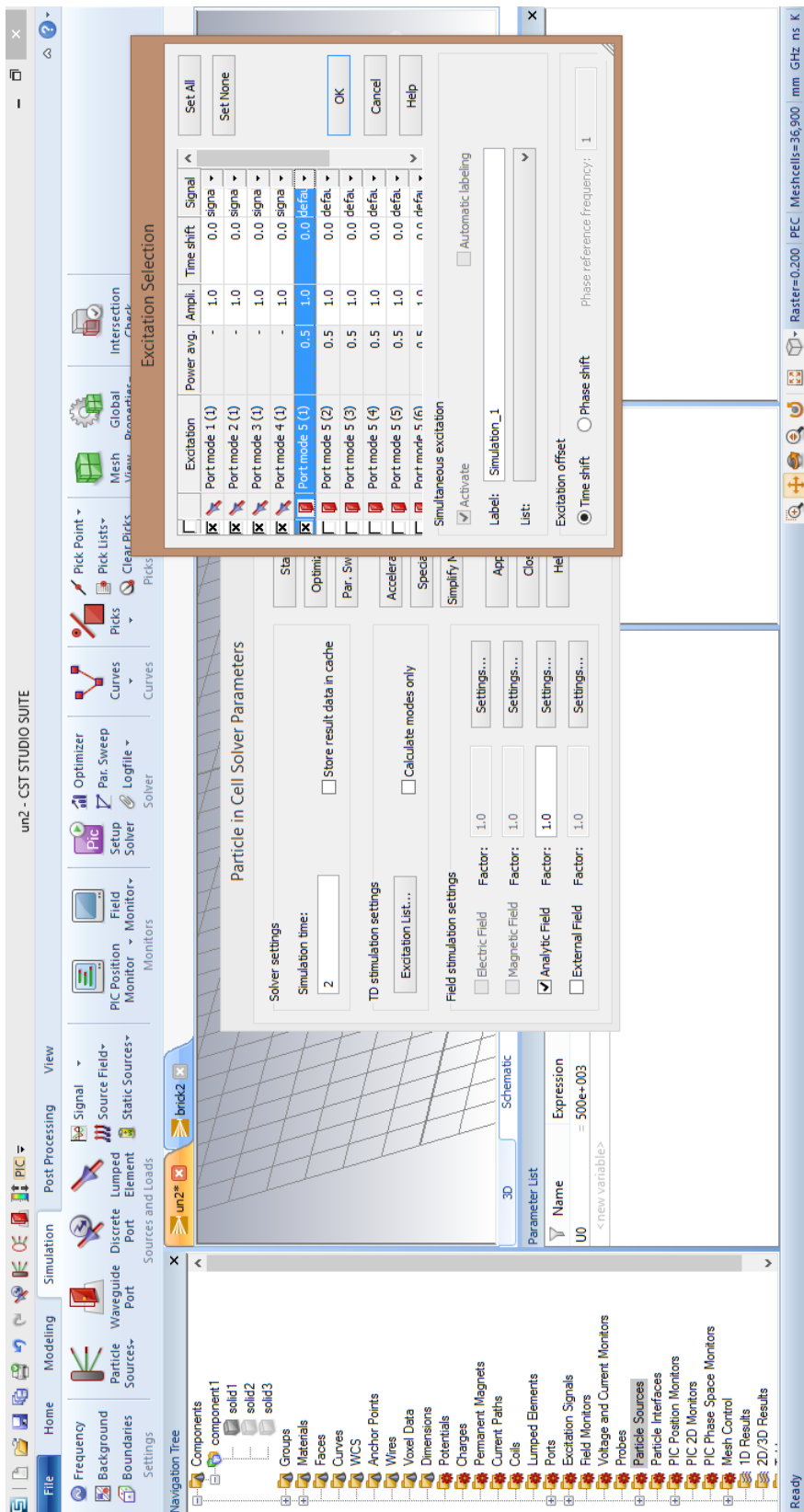


Рис. 6.14: Параметры задания связи сигнала напряжения с элементом Discrete Port и времени реализации численного моделирования

В проводимых численных расчетах важна точность получаемых результатов. Высокая точность результатов достигается мелким разбиением расчетной сетки, что приводит к существенному увеличению времени численного моделирования. При наличии соответствующего технического обеспечения время численного моделирования можно сократить. Достигается это с помощью распараллеливания расчета на N ядер процессоров или специализированной видеокарты компьютера. Для этого в окне Particle-in-Cell Solver Parameters следует нажать кнопку Acceleration, в появившемся окне (рисунок 6.15) следует выбрать пункт Multithreading (CPU) up to и/или Hardware acceleration.

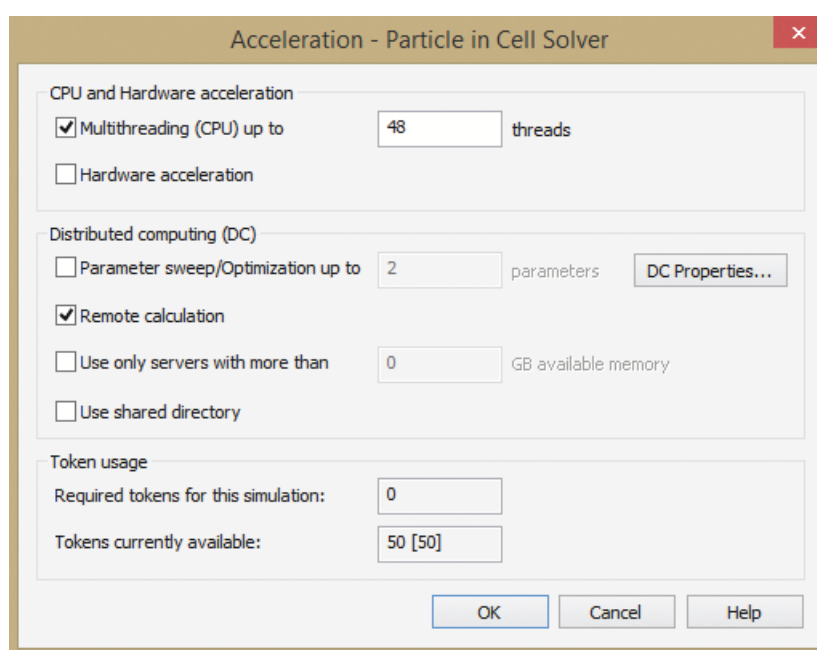


Рис. 6.15: Окно дополнительных настроек численного моделирования

6.1.3 Моделирование процессов в диодном промежутке и обработка результатов

В рассматриваемой задаче требуется установить зависимость полученного анодного тока диода от поданного напряжения и провести сопоставление получаемых результатов с законом $3/2$.

Метод анализа результатов заключается в снятии показаний средней величины тока на аноде в зависимости от величины поданного ускоряющего

напряжения. Диапазон значений напряжения устанавливается от 200 кВ до 1 МВ.

Для значений из диапазона напряжений с шагом 100 кВ проводится численное моделирование вышеописанным способом. При этом параметры начальных условий (за исключением подаваемого напряжения) не меняются. Напряжение устанавливается в разделе описания переменных. Можно также устанавливать величину напряжения непосредственно в разделе Emission и элементах Discrete Ports.

После завершения процесса моделирования результаты сохраняются в папках программы. Для получения значений средней величины тока анода в программе используется шаблон постобработки.

В шаблоне, вычисляющем среднюю величину (Mean Value, рис. 6.16), требуется загрузить исходные данные — реализацию тока на аноде, которая протоколируется программой по умолчанию. После выполнения данного шаблона в интервале времени от момента установления стационарной динамики сигнала тока до максимального времени расчета будет получено среднее значение тока на аноде для заданной величины напряжения.

По полученным в результате численного моделирования значениям строится график зависимости анодного тока от поданного напряжения, а также теоретическая аппроксимация по формуле (6.1), при этом значение перванса подбирается таким образом, чтобы кривая графика проходила в непосредственной близости от точек значений данных, полученных в результате численного моделирования.

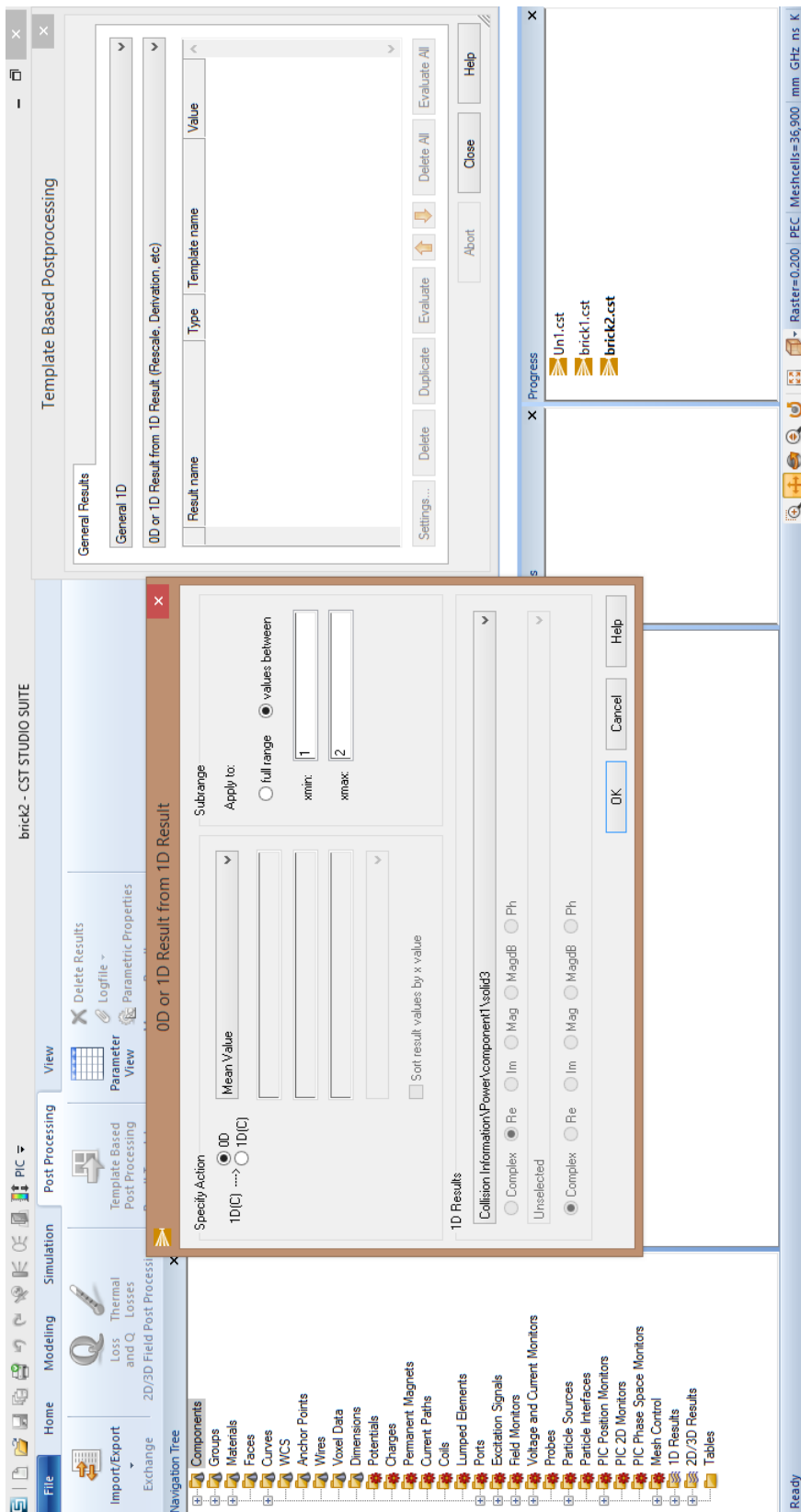


Рис. 6.16: Окно параметров шаблона постобработки

Таблица 6.1: Результаты численного эксперимента. Зависимость анодного тока от поданного напряжения при неизменной конфигурации модели.

Значение напряжения, кВ	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Анодный ток, кА	3,02	4,32	6,78	9,77	13,94	19,09	23,73	29,26	32,87
Анодный ток (формула (6.1)), кА	2,71	4,98	7,67	10,71	14,08	17,75	21,68	25,87	30,30

В таблице представлены результаты численного моделирования и значения тока, вычисленные по формуле 6.1 с подобранным значением первеанса.

На рисунке 6.17 ломанной линией соединены точки, соответствующие результатам численного моделирования, непрерывная линия соответствует значениям функции, полученным в результате расчета по формуле (6.1) с подобранным значением первеанса.

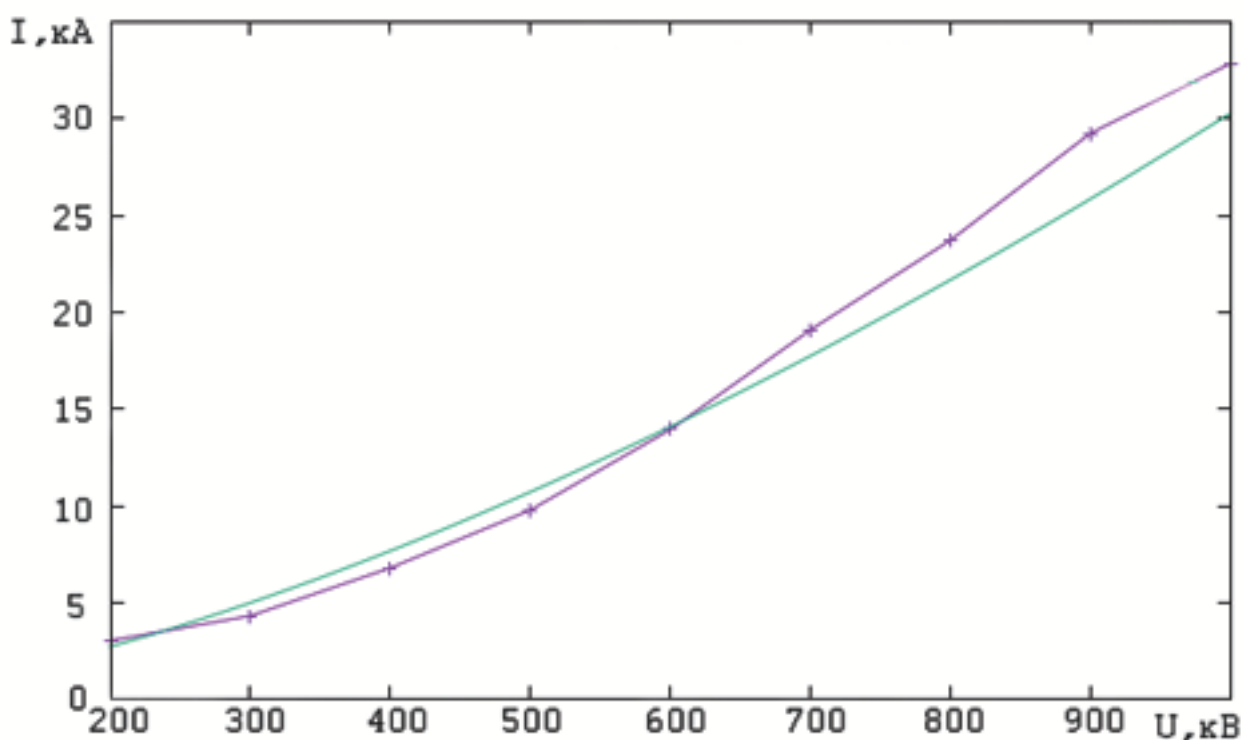


Рис. 6.17: Построенные в программе Gnuplot графики результатов численного моделирования и теоретической оценки

Значение эмпирически выбранного постоянного первеанса g равняется $30,3 \cdot 10^{-6}$. Порядок полученного значения первеанса g хорошо соотносится с порядком реальных экспериментальных физических значений данной вели-

чины.

6.1.4 Задания для самостоятельного исследования

В качестве самостоятельного исследования предлагается получить результаты численного моделирования диода с указанными на рисунках 6.1, 6.2, 6.4 геометрическими параметрами, самостоятельно подобрать значения первеанса, установить функциональную зависимость анодного тока от поданного напряжения в соответствии с формулой (6.1), заполнить таблицу аналогично таблице 6.1, сравнить полученные результаты с теми, которые представлены в методическом пособии.

Также в рамках данной задачи предлагается провести численное моделирование, установив новые параметры модели, не изменяя при этом остальные:

- Вариант 1. Высота катода – 2.88 мм, радиус катода – 0.6 мм.; высота цилиндра вакуумного пространства – 4 мм, радиус цилиндра вакуумного пространства – 1 мм, в диапазоне напряжений 500 кВ – 1 МВ,
- Вариант 2. Высота катода – 2.88 мм, радиус катода – 0.3 мм.; высота цилиндра вакуумного пространства – 4 мм, радиус цилиндра вакуумного пространства – 0.5 мм, в диапазоне напряжений 100 кВ – 500 кВ,
- Вариант 3. Высота катода – 1.44 мм, радиус катода – 0.6 мм.; высота цилиндра вакуумного пространства – 2 мм, радиус цилиндра вакуумного пространства – 1 мм; индукция магнитного поля – 0.5 Тл, в диапазоне напряжений 500 кВ – 1 МВ,
- Вариант 4. Индукция магнитного поля – 0.5 Тл, в диапазоне напряжений 500 кВ – 1 МВ,
- Вариант 5. Высота катода – 2 мм, радиус катода – 0.6 мм; высота цилиндра вакуумного пространства – 5 мм, радиус цилиндра вакуумного пространства – 1 мм; индукция магнитного поля – 0.5 Тл, в диапазоне напряжений 100 кВ – 500 кВ.

Для каждого из выбранных вариантов упражнения следует выполнять задачу в следующем порядке:

1. Запустить процесс численного моделирования для выбранного варианта, для значений напряжения в указанном диапазоне с шагом 100 кВ.
2. Получить результаты численного моделирования.
3. По полученным результатам построить график зависимости анодного тока от поданного напряжения. Оценить порядок перveenca. Подобрать численное значение перveenca таким образом, чтобы теоретическая кривая графика проходила в непосредственной близости от точек значений данных, полученных в результате численного моделирования.
4. Качественно оценить соответствие полученных данных с теорией закона $3/2$.
5. Сравнить значения полученного перveenca со значением, представленным в примере методического пособия.

6.2 Формирование виртуального катода в эквипотенциальном пространстве дрейфа

При движении электронов в пространстве дрейфа минимум распределения потенциала будет находиться на некотором расстоянии от поверхности катода. При больших значениях плотности тока эмиссии в пространстве дрейфа формируется виртуальный катод — потенциальный барьер, отражающий часть электронного потока к плоскости инжекции и на боковую поверхность пространства дрейфа.

Возникновение потенциального барьера определяется пространственным зарядом инжектируемого в камеру дрейфа электронного потока. Часть электронов, имеющих энергию, большую значения высоты потенциального барьера (значения минимума потенциала), продолжают движение к аноду, другая часть отражается от барьера обратно к катоду. Глубина потенциальной ямы виртуального катода равна средней кинетической энергии электронного потока.

При малых токах пучка глубина провисания потенциала мала, и электронный пучок полностью проходит без отражений к выходной плоскости пространства (режим стационарной транспортировки потока). С ростом тока пучка (при фиксированной энергии ускорения электронов) плотность пространственного заряда пучка также растет и, как следствие, увеличивается глубина потенциальной ямы.

При некотором токе пучка, называемом предельным вакуумным (или критическим) током, глубина потенциального барьера становится достаточной для отражения электронов — происходит формирование виртуального катода. Виртуальный катод в пучке обычно ведёт себя нестационарным образом, совершая колебания как во времени, так и в пространстве. Это позволяет использовать электронные потоки со сверхкритическими токами в режиме формирования виртуального катода для генерации мощного СВЧ излучения.

Величина критического тока определяется следующим соотношением:

$$I = \frac{mc^3 (\gamma^{2/3} + 1)^{3/2}}{e \frac{d}{r} + 2 \ln \frac{r}{R}}. \quad (6.2)$$

Здесь m — масса электрона, e — заряд электрона, c — скорость света, d — толщина трубчатого пучка, r — радиус пучка, R — радиус трубы дрейфа, γ — релятивистский фактор, находящиеся из соотношения

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{u}{c}\right)^2}}, \quad (6.3)$$

где u — начальная скорость электронов.



Рис. 6.18: Вид модели в рамках задачи о предельном вакуумном токе

Значение γ можно непосредственно получить, зная поданное напряжение:

$$\gamma = 1 + \frac{eU_a}{mc^2} \quad (6.4)$$

В рамках данной задачи необходимо выполнить следующую последовательность действий для постановки численного моделирования и оформления результатов для каждого из предлагаемых для самостоятельного решения вариантов задачи:

1. Составить геометрическую модель, аналогичную изображенной на рисунке 6.18.
2. Выполнить все действия, необходимые для постановки численного моделирования, используя инструмент создания рабочей сетки, инструмент моделирования эмиссии частиц и другие средства задания параметров рабочего процесса, описанные ранее.
3. Оценить значение критического тока, подставив численные значения геометрических и физических параметров системы в соотношение (6.2).
4. Провести численное моделирование при разных токах пучка, выше и ниже критического. Получить характерный фазовый портрет виртуального катода, используя инструмент получения фазовых портретов для заданных моментов времени (PIC Phase Space Monitor), задав по оси абсцисс фазового портрета значение координаты z , а на оси ординат — продольной скорости частиц u_z (рис. 6.19).
5. Качественно оценить значение критического тока, полученное в результате численного моделирования, при котором начинает устанавливаться характерный фазовый портрет (рис. 6.20) для виртуального катода, сравнить со значением, полученным аналитически. Оформить результаты в виде таблицы.

6. По полученным в результате численного моделирования данным, а также аналитически построить графики зависимости критического тока от релятивистского фактора γ ; Сопоставить вид полученных графиков (см. рис. 6.21).

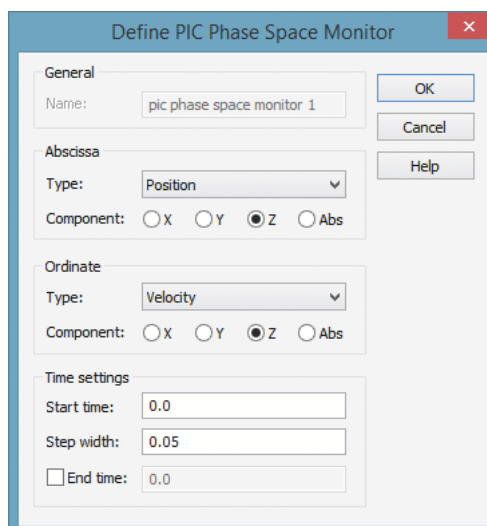


Рис. 6.19: Задание параметров инструмента PIC Phase Space Monitor для получения фазового портрета

В таблице 6.2 в качестве примера оформления приводятся результаты, полученные для следующих параметров модели: $r/R = 4$, $d/r = 3/5$, $B = 1$ Тл, длина трубы дрейфа – 50 мм.

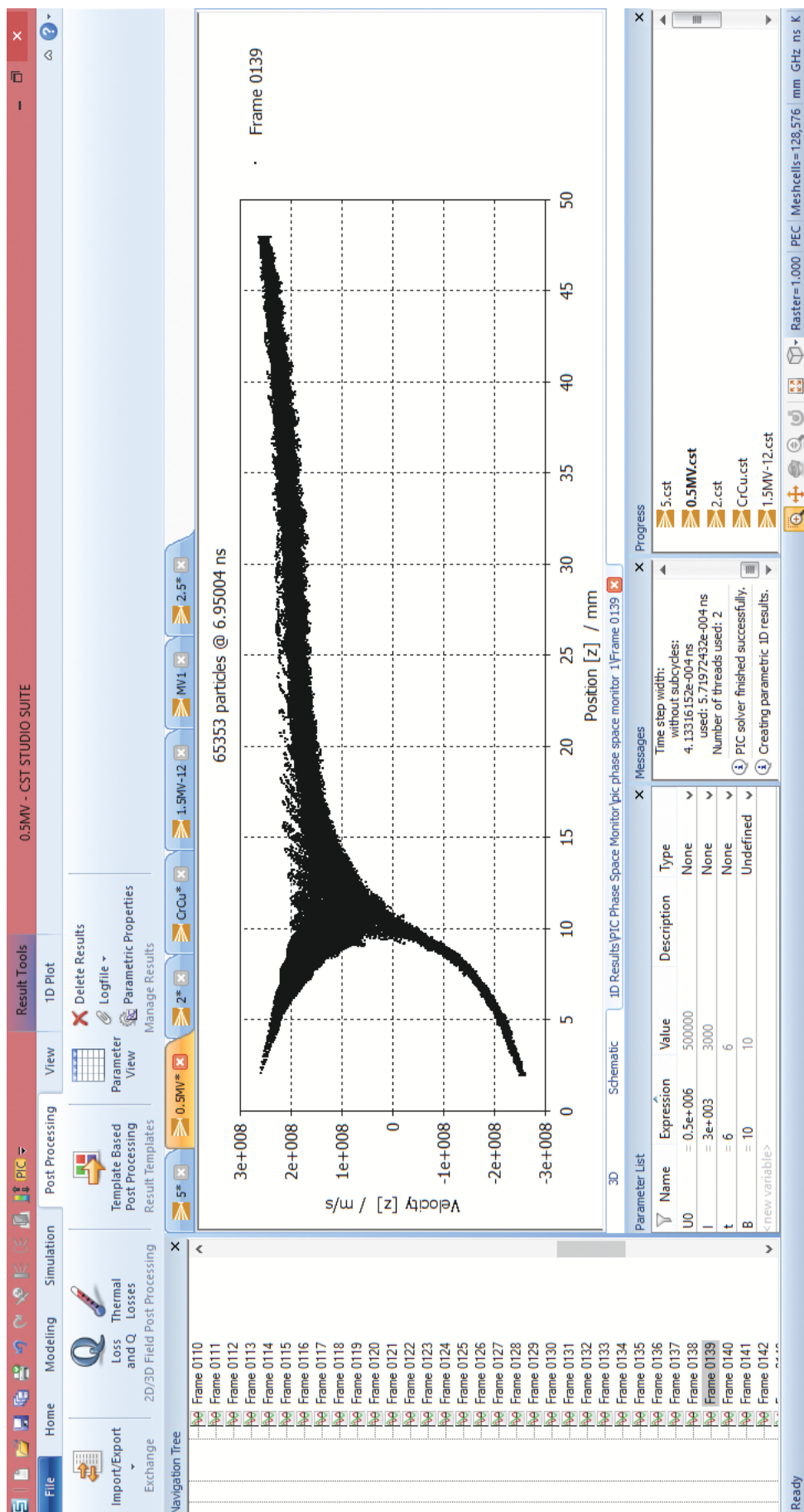


Рис. 6.20: Вид характерного фазового портрета для системы с виртуальным катодом

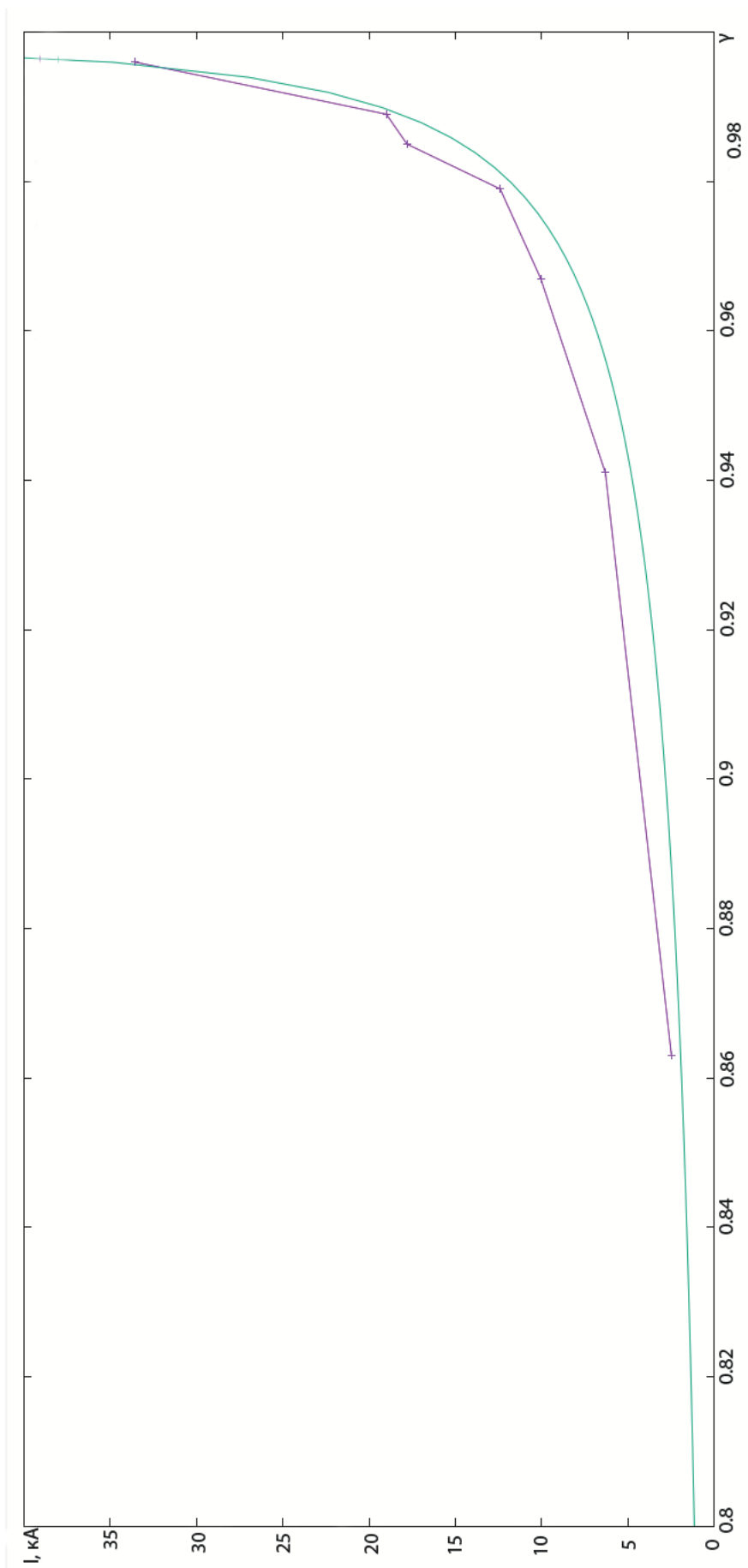


Рис. 6.21: Полученные численно и аналитически графики зависимости критического тока от γ

Таблица 6.2: Вид оформления результатов эксперимента. Значения критического тока, полученные в результате численного моделирования, а также с использованием аналитического выражения (6.2) при указанных выше параметрах.

Величина напряжения, кВ	500	1000	1500	2000	2500	3000	5000
Значение γ	0,863	0,941	0,967	0,979	0,985	0,989	0,996
Результаты моделирования, кА	2,4	6,3	10	12,4	17,8	18,3	31,7
Аналитические значения, кА	1,97	4,92	8,22	11,72	15,34	19,06	34,48

Для данной задачи предлагается задать параметры трубы дрейфа, указанные для каждого варианта, провести численное моделирование и оформить результаты аналогично таблице 6.2, построить графики зависимости критического тока от релятивистского фактора (аналитические и численные результаты), как показано на рисунке 6.21.

- Вариант 1. Высота цилиндра вакуумного пространства – 50 мм; радиус цилиндра вакуумного пространства – 5 мм; внешний и внутренний радиусы кольца катода – 5 мм и 3 мм соответственно; значение магнитной индукции – 0.5 Тл;
- Вариант 2. Высота цилиндра вакуумного пространства – 50 мм; радиус цилиндра вакуумного пространства – 5 мм; внешний и внутренний радиусы кольца катода – 5 мм и 3 мм соответственно; значение магнитной индукции – 1 Тл;
- Вариант 3. Высота цилиндра вакуумного пространства – 50 мм; радиус цилиндра вакуумного пространства – 10 мм; внешний и внутренний радиусы кольца катода – 5 мм и 0 мм соответственно; значение магнитной индукции – 0.5 Тл;
- Вариант 4. Высота цилиндра вакуумного пространства – 50 мм; радиус цилиндра вакуумного пространства – 5 мм; внешний и внутренний радиусы кольца катода – 2.5 мм и 1.5 мм соответственно; значение магнитной индукции – 0.5 Тл;

- Вариант 5. Высота цилиндра вакуумного пространства – 50 мм; радиус цилиндра вакуумного пространства – 5 мм; внешний и внутренний радиусы кольца катода – 2.5 мм и 0 мм соответственно; значение магнитной индукции – 1 Тл.

6.3 Турботрон

Турботрон (рис. 6.22) представляет собой СВЧ-диод с протяженными цилиндрическим катодом со взрывной эмиссией и цилиндрическим анодом, которые разделены малым зазором. Такая схема позволяет получать очень большие токи пучка, а следовательно, и сверхбольшую выходную мощность СВЧ излучения.

Вдоль оси турботрона приложено магнитное поле с индукцией 1 Тл. Формируется пучок, который имеет ток, значительно превышающий предельный вакуумный ток для рассматриваемой геометрии. Большинство электронов не могут преодолеть потенциальный барьер виртуального катода и остаются в промежутке между катодом и виртуальным катодом, создавая слой плотной турбулентной электронной плазмы с широким спектром возбуждаемых мод.

В рамках данной задачи необходимо выполнить последовательность действий для постановки численного моделирования и оформления результатов для каждого из предлагаемых для самостоятельного выполнения вариантов задачи:

1. Создать в CST Particle Studio геометрическую модель, аналогичную изображенной на рисунке 6.22, с указанными ниже параметрами.
2. Выполнить все действия, необходимые для постановки численного моделирования в CST PS, используя инструмент создания рабочей сетки, инструмент моделирования эмиссии частиц и другие средства задания параметров рабочего процесса, описанные ранее.
3. Провести численное моделирование. Получить характерный фазовый портрет виртуального катода, используя инструмент построения фазовых портретов для заданных моментов времени (PIC Phase Space Monitor),

задав по оси абсцисс значение координаты z , а по оси ординат — продольной скорости u_z (рис. 6.19).

Параметры турботрона на рисунке 6.22: радиус катода — 25.4 мм, высота катода 3 мм, радиус диодного промежутка — 60 мм, длина диодного промежутка — 30 мм, радиус анода — 50 мм, высота анода — 3 мм, величина индукции продольного магнитного поля — 1 Тл, подаваемое напряжение — 1 МВ, тока пучка — 50 кА. Полученное в результате численного моделирования с помощью шаблона постобработки пиковое значение мощности равно 83 ГВт.

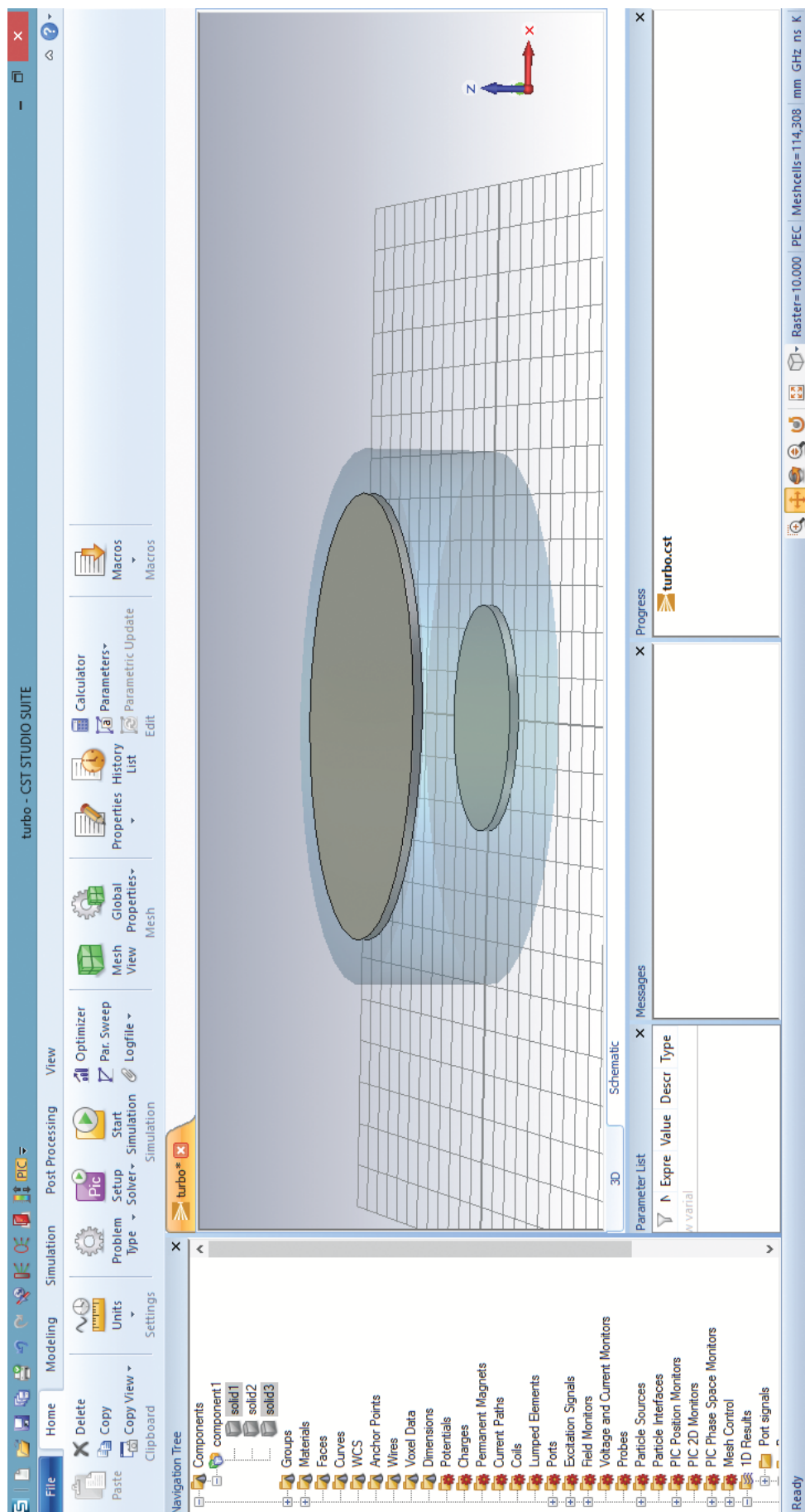


Рис. 6.22: Модель турботрона

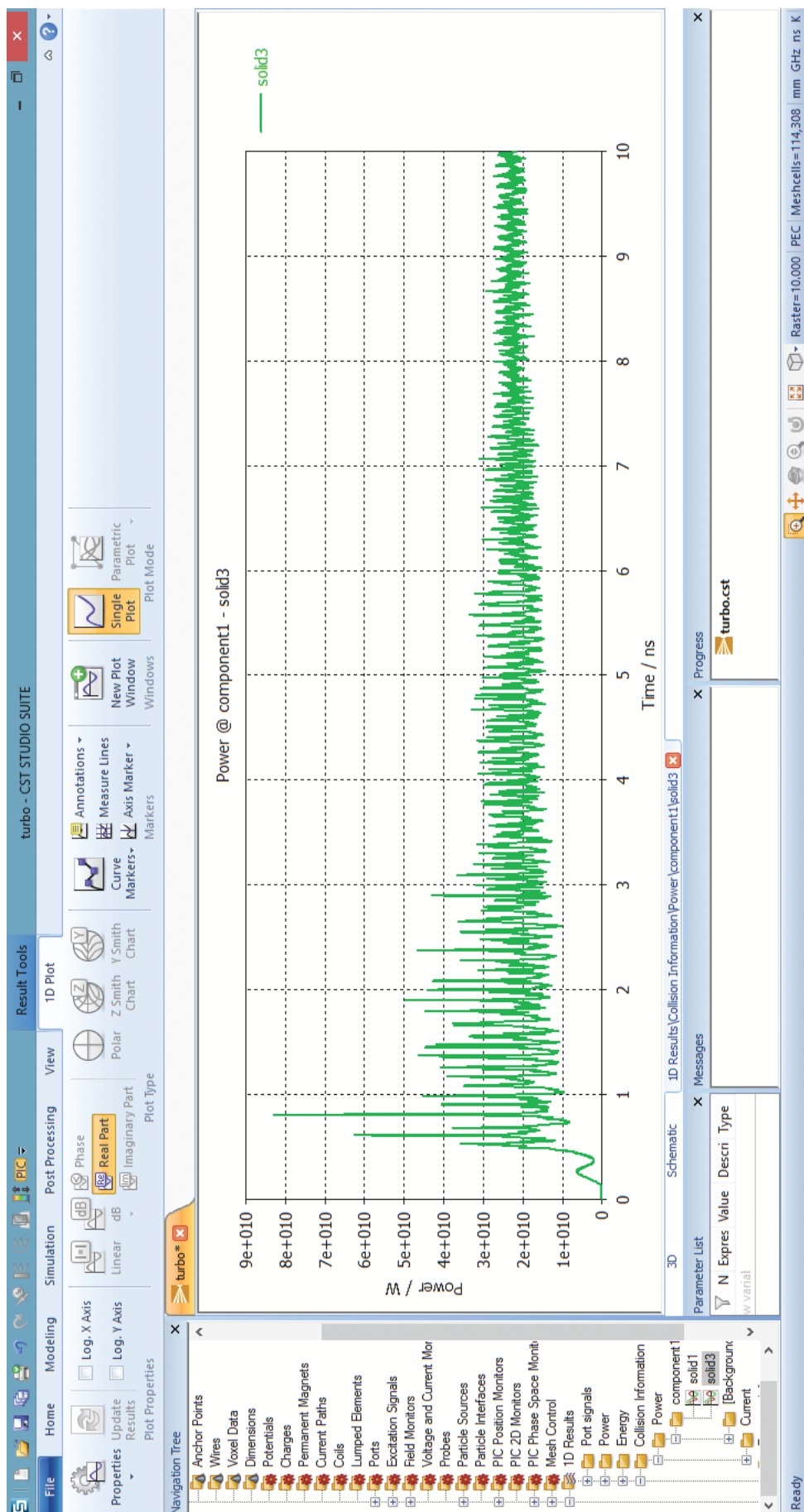


Рис. 6.23: Реализация мощности, создаваемой оседаемым на аноде током

В качестве задач для самостоятельного исследования представлены следующие варианты:

- Вариант 1. Снять и построить в программе Gnuplot зависимость от времени отношения выходной мощности (на аноде) к мощности инжектируемого пучка (в диапазоне от 0 до 7 нс). Время насыщения тока эмиссии – 2 нс.
- Вариант 2. Снять и построить в программе Gnuplot зависимость от времени отношения выходной мощности (на аноде) к мощности инжектируемого пучка (в диапазоне от 0 до 15 нс). Время насыщения тока эмиссии – 5 нс.
- Вариант 3. То же, что и Вариант 1, но для длины диодного промежутка – 25 мм.
- Вариант 4. Снять показания максимальных значений мощности в зависимости от величины индукции магнитного поля в диапазоне 0.5 – 1 Тл с шагом 0.1 Тл.
- Вариант 5. Снять показания максимальных значений мощности в зависимости от величины тока пучка в диапазоне 30 – 50 кА с шагом кА.