

Геометрическая и физическая параметризация в конечно-элементном пакете Flux v.10.1.2 Cedrat

как подход к оптимизации датчиков скорости / положения

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

В статье рассказано о технологиях и возможностях современного компьютерного конечно-элементного моделирования автомобильных магнитоуправляемых датчиков скорости / положения, обеспечением, новейшим представителем которого является Flux v.10.1.2 Cedrat (www.cedrat.com). Рассказ о технологиях компьютерного моделирования, реализованных в препроцессоре данного пакета, проиллюстрирован классическим примером датчика Холла ферромагнитного зубчатого ротора, для которого выполнены этапы геометрического описания, генерации сетки и физического описания (вплоть до применения сценария решения), визуализирующие возможности дальнейшей параметрической оптимизации устройства.

Введение

Типичный автомобильный датчик скорости/положения, в первую очередь рекомендованный для расчетного моделирования методом конечного элемента, — это датчик ферромагнитного зубчатого ротора [1]. Данный класс устройств включает как широко распространенные индуктивные датчики variable reluctance speed sensor, так и активные датчики Холла, а также АМР/ГМР на основе ИС, теперь уже второго поколения — со схемами компенсации и микроконтроллерной ЦОС, но общим для них является использование ротора с нелинейным ферромагнитным материалом.

Индуктивный датчик включает зубчатый ротор — цель, магнит и обмотку, подключенную к нагрузочному сопротивлению, датчик Холла еще меньше и проще — вместо обмотки в качестве измерительного элемента используется плата Холла, интегрированная в ИС, кроме ИС Холла стационарная часть датчика будет включать только обратносмещающий магнит [2–3]. Индуктивное устройство также включает в себя конечник, вращение цели мимо которого изменяет магнитный поток, создающий первичный аналоговый сигнал переменной амплитуды магнитной индукции/напряжения, обнаруживаемый измерительной схемой. Датчик Холла, АМР, ГМР выполняют те же функции

формирования аналогового сигнала магнитной индукции/напряжения, но постоянной во времени амплитуды, не зависящей от частоты вращения ротора. Амплитуда первичного сигнала, надежность, точность, многие частные параметры в динамике зависят только от предустановленных геометрических и магнитных параметров ротора и сенсорной части датчика. Параметрическая оптимизация автомобильных магнитоуправляемых датчиков — важная научно-техническая задача, так как этот тип устройств весьма перспективен в настоящее время [4–6].

Типичные автомобильные применения устройств включают:

- спидометры: коробка передач;
- АБС/TCS (Traction Control System): контроль частоты вращения колес;
- системы зажигания: контроль скорости и положения двигателя;
- электронное управление коробкой передач и ряд других.

Задача параметрической оптимизации датчика может быть сформулирована как нахождение такого статического и динамического соотношения и распределения геометрических и магнитных параметров, которое бы обеспечивало минимальное значение целевой функции, аргументами для которой выступают различные смещения и погрешности. Разработка расчетной методики для ши-

рокого класса автомобильных магнитоуправляемых датчиков скорости/положения — завершающая цель работы, начало которой положено в [7–16] и продолжено в [17–18].

Практическое конечно-элементное моделирование электромагнитного устройства предполагает 5 этапов:

- геометрическое описание;
- генерацию сетки;
- описание физических свойств;
- процесс решения;
- постобработку результатов.

Первый этап в конечно-элементном расчете — это построение геометрической модели рассчитываемой конструкции/устройства. Параметризация геометрических размеров необходима уже в процессе геометрического описания модели.

Геометрическая модель определяет геометрическую форму рассчитываемой конструкции, а конечно-элементная модель, которая строится на втором этапе, содержит в себе полную информацию о расположении и взаимосвязях узлов и конечных элементов. Физика модели предполагает назначение свойств или параметризацию материалов для выполнения следующих двух этапов, которыми являются решение и обработка результатов, — с целью анализа влияния контролируемых параметров и оптимизации целевой функции.

В этом значительно помогают современные технологии конечно-элементного анализа, реализованные в коммерческом программном пакете высокого уровня Flux компании Cedrat, специализированном для расчетов рабочих магнитных полей. В 2007 году была представлена новейшая версия — Flux v. 10.1.2, максимально интегрирующая преимущественные технологии компьютерного моделирования [1]. Применение технологий геометрического, конечно-элементного и физического параметрического описания автомобильного датчика ферромагнитного зубчатого ротора, этапы которого описываются далее в статье, позволяет показать, насколько реален полный компьютерный контроль геометрических и магнитных параметров вновь создаваемого устройства.

Стратегия геометрического и конечно-элементного описания модели в пакете Flux v. 10.1.2 edited by Cedrat

Моделируемый датчик ферромагнитного зубчатого ротора включает (рис. 1):

- ротор с К зубцами, опционально — с валом;
- один бесконтактный датчик — статор, включающий ИС Холла с интегрированными измерительными элементами и обратносмещающий магнит.

Опционально моделируемое устройство может включать второй бесконтактный датчик — статор 2, или три датчика вместе — в зависимости от задачи [2–3, 19].

В Flux возможны две стратегии геометрического описания:

- целостное описание: описание всего устройства в одном проекте Flux;
- раздельное описание частей устройства в нескольких проектах и последующее объединение проектов.

Вторая стратегия предпочтительнее.

Описание моделирования предваряет краткое введение в программную среду Flux.

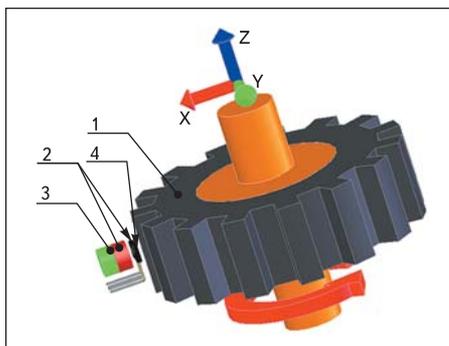


Рис. 1. Моделируемое магнитоуправляемое устройство — автомобильный датчик ферромагнитного зубчатого ротора:
1 — ферромагнитный зубчатый ротор;
2 — основные компоненты статора;
3 — обратносмещающий магнит,
4 — ИС датчика
(дифференциальная ИС Холла TLE4921 Infineon)

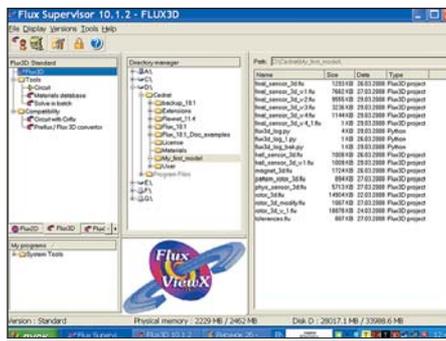


Рис. 2а. Вид модуля Flux3D до начала создания проекта

Работа начинается с запуска супервайзера FluxSupervisor 10.1.2 и выбора вкладки Flux3D в менеджере программ (рис. 2а), версия пользователя должна быть стандартной. Все детали работы с пакетом в данной статье не поясняются, но при использовании ее читателем как учебного руководства упомянутые детали должны быть учтены.

Программа Flux3D позволяет выполнять все 5 фаз работы с проектами Flux. Эта программа запускается двойным кликом мыши по верхней строчке дерева менеджера программ, при этом открывается окно процессора Flux3D v. 10.1.2 (рис. 2б).

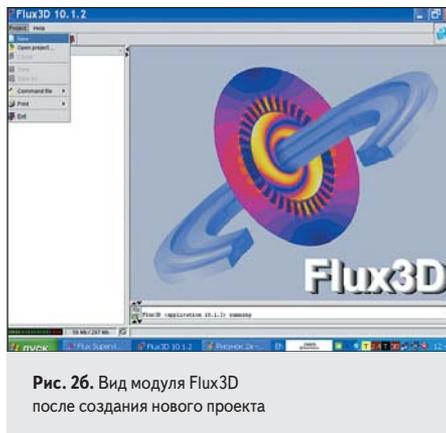


Рис. 2б. Вид модуля Flux3D после создания нового проекта

Поначалу в открывшемся окне Flux3D пользователю доступны только два пункта меню: **Project** и **Help**.

Flux предоставляет пользователю большую базу документации для построения модели. В оригинальной папке в примеров Geometry-Mesh включены руководства по созданию геометрической модели и генерации сетки индуктивного датчика — как для 2D-, так и для 3D-моделирования. Можно попытаться открыть с командой **Project, Open** в окне Flux3D готовые файлы описания PROBE_3D.FLU (магнит с обмоткой), SENSOR_3D.FLU и WHEEL_BASE_3D.FLU.

В данной статье изложена оригинальная последовательность геометрического, конечно-элементного и физического описания датчика Холла, выполненная автором.

В окне Flux3D по команде **Project, New** пользователю доступна возможность созда-

ния нового проекта, но если какой-то проект открыт в текущее время, его необходимо закрыть командой **Project, Close**.

Новый проект под названием ANONYMOUS открывается со стандартным геометрическим контекстом Geometry, что показывает иконка в правом верхнем углу окна (в начале работы доступен также контекст Mesh).

Текущий проект в любой момент может быть сохранен, например, незамедлительно, в новой папке D:\Cedrat\Flux_10.1_Doc_examples\Examples3D\Hall_Tutorial по команде **Project, Save** (рис. 2в). Для проекта ротора выберем, к примеру, имя ROTOR_3D.FLU, для статора датчика — имя HALL_SENSOR_3D.FLU, для проекта, объединяющего объекты ротора и датчика (датчиков) — имя FINAL_SENSOR_3D.FLU.

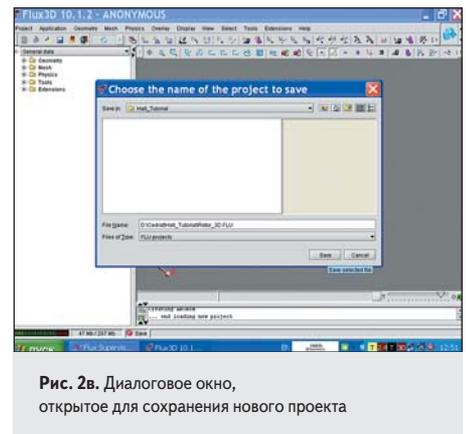


Рис. 2в. Диалоговое окно, открытое для сохранения нового проекта

В соответствии с этапами моделирования всего в Flux3D существует 5 контекстов работы:

- геометрия (Geometry);
- сетка (Mesh);
- физика (Physics);
- процесс решения (Solving Process);
- постобработка (Post-processing).

Три основных зоны окна включают:

- дерево данных;
- графическую зону, отображающую единичные объекты (entities);
- зону истории (инструкции на языке Phyton).

В главное меню входят набор средств управления проектами, построения геометрии устройства, генерации сетки для домена и визуализации устройства в течение различных этапов проектирования.

Контекст выбирается стрелками в правом верхнем углу окна, и от этого выбора зависит, какие панели инструментов доступны пользователю.

Панели инструмента с кнопками быстрого доступа в геометрическом контексте разделены на следующие группы:

- управление проектами;
- работа с геометрией модели;
- управление графической зоной;
- вызов контекста.

Выбор геометрического контекста дает возможность обратиться к следующим группам кнопок работы с геометрией:

- создание единичных объектов;
- трансформация — распространение/выдавливание (экструзия) точек, линий, поверхностей;
- создание поверхностей и объемов;
- вычисление геометрических величин;
- проверка геометрии.

Построение геометрии в Flux начинается с создания геометрических средств: параметров и координатных систем, являющихся единичными объектами. Параметры как единичные объекты, упрощающие описание других единичных геометрических объектов — точек, линий и облегчающие построение модели, создаются в первую очередь.

Стратегия геометрического и конечно-элементного описания моделируемого устройства включает:

- создание проекта ротора;
- создание новой локальной цилиндрической системы координат (СК) для ротора с модифицируемым углом поворота;
- определение и задание параметров паттерна зуба и контура ротора относительно СК ротора;
- создание в новой СК точек, линий, контура паттерна зуба;
- создание угловой трансформации паттерна зуба для создания контура (контуров) ротора методами распространения и выдавливания (экструзии);
- создание объемов и контуров ротора выдавливанием созданных ранее контуров (контура) как трансформации — трансляции контура на высоту зуба;
- определение и наложение сетки на модель ротора;
- сохранение и закрытие проекта;
- создание проекта датчика Холла — статора;
- создание новой главной локальной декартовой СК для позиционирования датчика в финальном проекте;
- создание новой локальной декартовой СК для геометрии магнита;
- параметризация геометрии магнита относительно СК, создание точек, линий, контура вращения магнита;
- создание угловой трансформации контура магнита и выдавливание объемов и контуров;
- создание локальных СК, параметризация, создание точек, линий, контуров, трансформаций, объемов ИС Холла;
- определение и наложение сетки на модель датчика (статора);
- сохранение и закрытие проекта датчика;
- создание нового финального проекта;
- позиционирование (импортирование) в финальный проект объектов ротора и статора, создание дополнительных параметров позиционирования;
- добавление объема воздуха в модели бесконечного бокса;
- определение и наложение сетки на финальную модель датчика;

- физическое описание модели, создание материалов с предустановленными магнитными/ферромагнитными свойствами и назначение их геометрическим объемам модели;
- сохранение проекта;
- запуск сценария решения.

Геометрическое описание и генерация сетки для ротора

Для ротора применимы следующие средства геометрического описания Flux: геометрические параметры, координатные системы и трансформации.

Анализ геометрии ротора предполагает следующую последовательность геометрического описания (рис. 3):

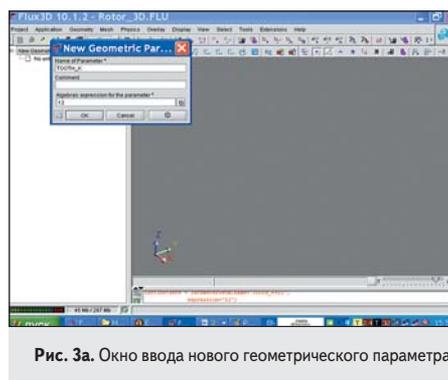


Рис. 3а. Окно ввода нового геометрического параметра

- 1) Геометрическая параметризация (рис. 3а). Для облегчения изменения размеров элементарных паттернов и всего ротора создаются следующие параметры:
 - количество зубцов $TOOTH_K=12$;
 - внешний радиус ротора $TOOTH_OR = 58/2 = 29$ мм;
 - внутренний радиус паттерна зуба $TOOTH_IR = TOOTH_OR - 5$ мм = 24 мм;
 - ширина зуба — длина сегмента окружности $TOOTH_LINE = 7$ мм;
 - высота зуба $TOOTH_HGHT = 14$ мм;
 - угол сектора периода кодирования $GAMMA = 360/TOOTH_K$;
 - константа $\pi PI = 3.1416$;
 - период кодирования $T = PI \times TOOTH_OR \times GAMMA / 180$ или $T = 2 \times PI \times TOOTH_OR / TOOTH_K$;
 - угол сектора паттерна зуба $BETA = TOOTH_LINE \times 180 / PI / TOOTH_OR$;
 - внутренний радиус ротора для посадки на вал $ROTOR_HOLE_R = 30/2 = 15$ мм.
- 2) Для позиционирования ротора в финальный проект создается параметр $ANGLE_Z=0$, определяющий угловое положение ротора.
- 3) Создание цилиндрической СК COORDSYS_ROTATOR (рис. 3б) с единицами измерения миллиметры и градусы, определяемой относительно глобальной СК пакета как имеющей начало отсчета в точке ее центра (0,0,0), также соответствующим центру создаваемого ротора, с углом поворота $ANGLE_Z$ вокруг оси Z глобальной СК и нулевыми углами поворота вокруг осей X и Y.

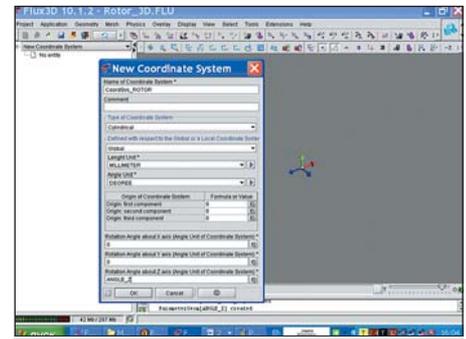


Рис. 3б. Окно создания новой цилиндрической СК COORDSYS_ROTATOR с введенными параметрами

- 4) Создание точек паттерна зуба посредством введения их параметрических координат в СК ротора (рис. 3в).

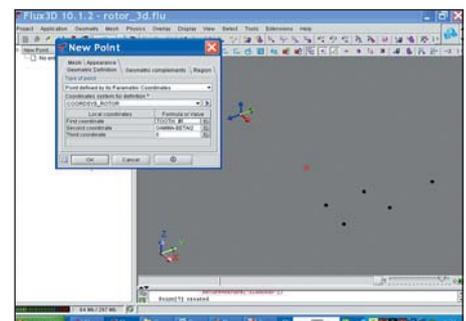


Рис. 3в. Окно ввода параметрических координат точек с результатами в графической зоне

- 5) Графическое соединение точек линиями, автоматическое создание контура паттерна зуба (рис. 3г–е).

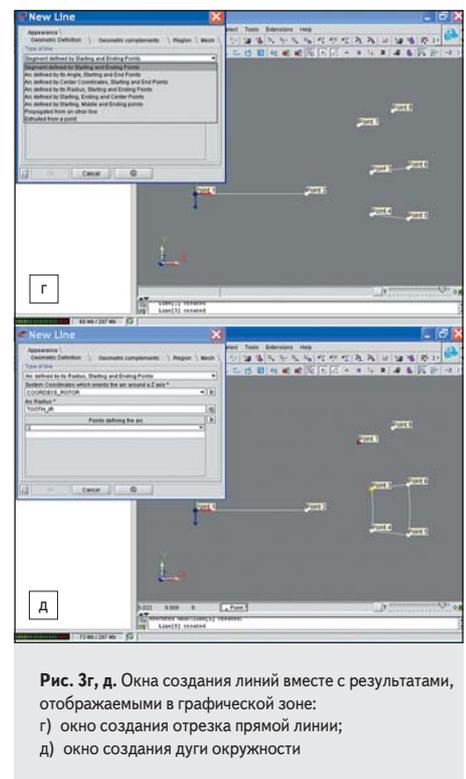


Рис. 3г, д. Окна создания линий вместе с результатами, отображаемыми в графической зоне: г) окно создания отрезка прямой линии; д) окно создания дуги окружности

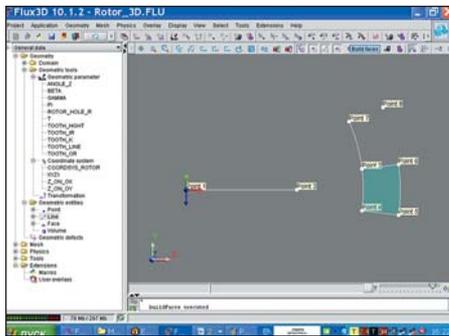


Рис. 3е. Кнопка и результат создания контура паттерна зуба

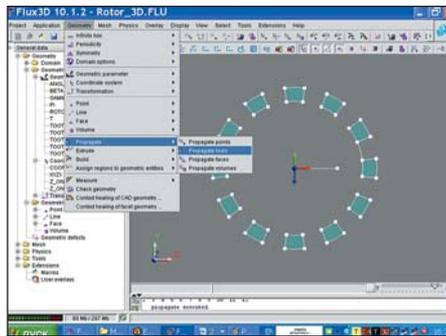


Рис. 3и. Вызов команды для распространения линии 6 вместе с результатом применения трансформации TRANSF_ROTATOR_ROT для контура

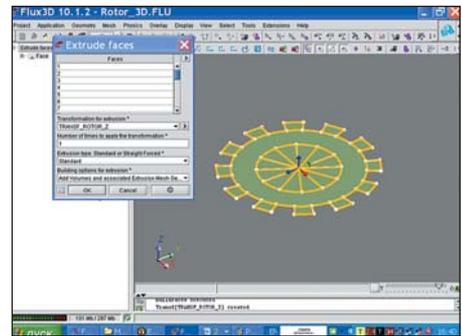


Рис. 3н. Окно выдавливания всех выбранных контуров ротора посредством применения TRANSF_ROTATOR_Z

- 6) Создание трансформации углового типа TRANSF_ROTATOR_ROT в COORDSYS_ROTATOR (рис. 3ж).
- 7) 12-кратное распространение контура и линии 6 паттерна зуба за счет применения ROTATOR_ROT_Z (рис. 3з-и).
- 8) Выдавливание линии 1 паттерна зуба за счет применения TRANSF_ROTATOR_ROT, автоматическое построение недостающего контура (рис. 3к-л).
- 9) Создание трансформации — трансляции TRANSF_ROTATOR_Z в СК ротора на высоту TOOTH_HGHT (рис. 3м).
- 10) Выдавливание всех созданных контуров ротора посредством применения TRANSF_ROTATOR_Z (рис. 3н-о).
- 11) Создание трансформаций — трансляций TRANSF_BAR_1 и TRANSF_BAR_2 для

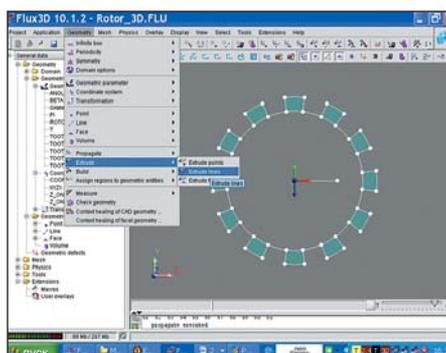


Рис. 3к. Вызов команды для выдавливания линии 1 вместе с результатом применения трансформации TRANSF_ROTATOR_ROT для контура и линии

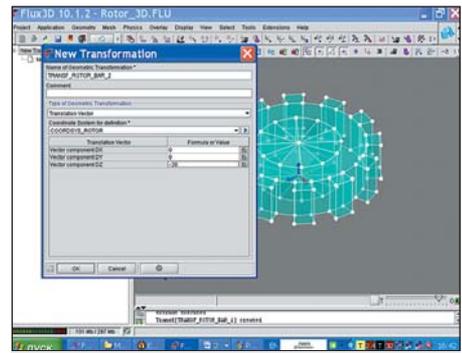


Рис. 3о. Окно создания одной из трансформаций — трансляций TRANSF_ROTATOR_BAR_2 в СК ротора для выдавливания объемов под вал ротора на высоту 20

моделирования выступающих частей вала, возможно, с параметризацией высоты этих частей (рис. 3о).

- 12) Выдавливание двух объемов валов из центральных контуров ротора (рис. 3п).

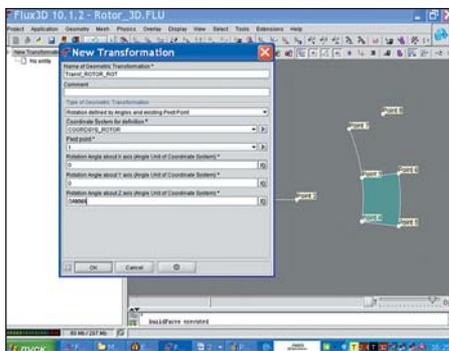


Рис. 3ж. Окно создания трансформации углового типа TRANSF_ROTATOR_ROT

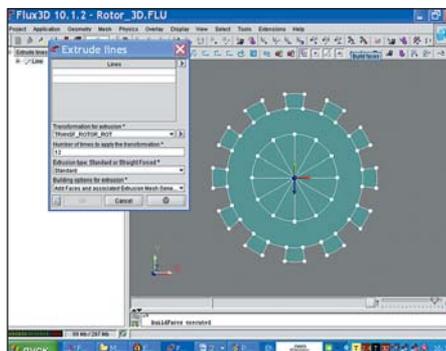


Рис. 3л. Окно с результатами выдавливания линии 1 вместе с результатом автоматической доработки недостающих контуров

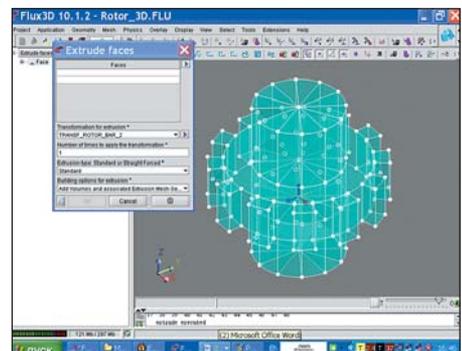


Рис. 3п. Автоматически инициализируемое окно команды Extrude вместе с результатами применения обеих трансформаций — трансляций TRANSF_ROTATOR_BAR_x

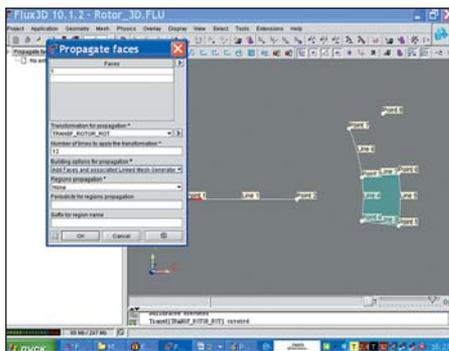


Рис. 3з. Окно применения трансформации TRANSF_ROTATOR_ROT для распространения контура

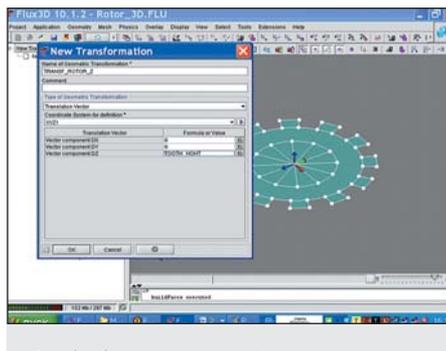


Рис. 3м. Окно создания трансформации — трансляции TRANSF_ROTATOR_Z в СК ротора на высоту TOOTH_HGHT

Создать новый геометрический объект в Flux можно с помощью соответствующей команды главного меню или кнопки панели инструментов. Для нового параметра предназначена команда **Geometry, Geometric Parameter, New**. Кроме этого, в Flux существует возможность вызова команд из дерева данных. Например, для создания новой координатной системы необходимо левой кнопкой

мышью выбрать в дереве данных последовательно **Geometry, Geometric Tools, Coordinate System**, затем из контекстного меню при нажатии правой кнопки мыши выбрать **New**.

В диалоговом окне ввода, которое инициализируется после применения названных способов или автоматически после введения каждого параметра, имена параметров вводятся в поле **Name of Parameter***. Значения вводятся с клавиатуры в поле **Algebraic Expression for the parameter***, для которого по умолчанию выбрана вкладка **Definition**. Поля, обязательные к заполнению, в интерфейсных окнах Flux маркируются астериском. Во всех окнах доступна так называемая онлайн-система помощи (доступная при автономном просмотре), отмеченная специальным значком.

Геометрические параметры определяются именем и алгебраическим выражением, которое может включать:

- константы;
- арифметические операторы (+, -, *, /, **);
- арифметические функции, доступные в FORTRAN (SQRT, LOG, SIN и т. п.);
- другие параметры;
- комбинации.

Числовое значение параметра является независимым по отношению к системе координат, управляющей единицами измерения.

Для завершения работы команды создания необходимо кликнуть по кнопке **Cancel**, таким же образом выполняется выход и из всех других команд Flux.

Созданные геометрические параметры затем можно увидеть в дереве данных, развернув ветвь **Geometric Parameter**. Если вводились комментарии к ним, то они отображаются при движении курсора мыши напротив каждого параметра, но на русском языке этот сервис не доступен.

Теперь эти параметры можно выбирать для редактирования, модифицировать и удалять, пользователь достаточно легко обнаружит в главном или контекстном меню или на панели инструментов соответствующие команды **Edit** и **Delete**. Доступна кнопка **Undo** на панели инструментов или соответствующая команда из меню **Tools**, позволяющая отменить одну или несколько последних операций из списка.

В Flux существуют также и свои особенности выбора. Наиболее универсален способ выбора из дерева данных, он годится для всех объектов. Для выбора параметра можно подвести курсор к ветви **Geometric Parameter**, правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню, в котором после выбора пункта **Edit** становится доступен для редактирования любой параметр из открывшегося списка. Тот же сервис доступен и из главного меню. Для конкретного выбранного в дереве данных параметра нажатие правой кнопки и выбор пункта **Edit** или двойной клик мыши приводят к открытию окна редактирования только этого параметра.

Отдельно следует заметить, что для выбора графических объектов существует еще и возможность выбора в графической зоне. Так, например, созданную координатную систему COORDSYS_ROTOR можно увидеть и выбрать в дереве данных и графической зоне, если не был включен соответствующий фильтр для точек, линий или других типов единичных объектов. Любой из фильтров можно задействовать и отключить из пункта главного меню **Select** или с панели инструментов, подпункт **No selection** запрещает выбор любых объектов, включая системы координат, а подпункт **Free Selection** дает возможность подключать фильтр относительно первого выбранного объекта.

Пункт меню **Edit** позволяет редактировать одиночные entities, но в Flux существует также возможность редактирования групп единичных объектов, доступная с командой **Edit array** (вызывается из контекстного меню при выборе объекта). Причем эта команда работает и для одного выбранного объекта и более функциональна, так как позволяет редактировать различные атрибуты объектов, недоступные при вызове команды **Edit**.

Помимо простого удаления объекта, существует еще возможность удаления выбранного и всех связанных с ним — по команде **Force Delete**.

Аналогичные возможности создания, редактирования и удаления предусмотрены для всех групп объектов, в том числе и для координатных систем.

Все геометрические признаки определяются в координатной системе, создание собственной координатной системы облегчает и упрощает описание геометрической модели.

В Flux используются декартовы (Cartesian) координаты (x, y, z), цилиндрические (r, θ , z), сферические (r, θ , ϕ).

Глобальная декартова координатная система, в которой выполняются вычисления, с единицами измерения длин в миллиметрах и углов в градусах, недоступна пользователю Flux для модификации. Вместо этого ему предоставлена возможность в рамках его задачи создавать свою рабочую или пользовательскую координатную систему, определяемую относительно глобальной или другой локальной пользовательской системы координат.

Для данной координатной системы пользователь может определять единицы длины и угла относительно глобальной системы, миллиметры и градусы являются стандартными единицами. Координатная система, определенная относительно локальной, будет наследовать единицы измерения предка.

Все единичные объекты определяются в рабочей/пользовательской системе координат, а затем оцениваются в глобальной системе координат для вычислений.

Также в помощь пользователю Flux обеспечивает несколько стандартных декартовых СК, которые определяются относительно глобальной СК и автоматически создаются для каждого нового проекта. К ним относятся:

- XYZ1 (координаты начала отсчета и углы поворота всех осей относительно осей глобальной СК — нулевые);
- Z_ON_OX (координаты начала отсчета совпадают с глобальной СК, углы вращения вокруг осей: X — 90°, Y — 90°, Z — 0°);
- Z_ON_OY (координаты начала отсчета совпадают с глобальной СК, углы вращения вокруг осей: X — 90°, Y — 0°, Z — 0°).

Их можно удалять, модифицировать и переименовывать. При создании или редактировании СК открываются соответствующие диалоговые окна, где пользователь может ввести необходимую информацию.

Таблица 1. Описание точек паттерна зуба, впадины посредством параметрических координат

Порядковый номер точки	Координатная система	Локальные цилиндрические координаты		
		Первая (R)	Вторая (θ)	Третья (Z)
1	COORDSYS_ROTOR	0	0	0
2		ROTOR_HOLE_R	0	0
3		TOOTH_IR	BETA/2	0
4		TOOTH_IR	-BETA/2	0
5		TOOTH_OR	-BETA/2	0
6		TOOTH_OR	BETA/2	0
7		TOOTH_IR	GAMMA-BETA/2	0
8 (опционно)		TOOTH_OR	GAMMA-BETA/2	0

По ходу разработки проекта параметры и СК создаются в соответствии с описанием и рис. 3а–б, затем в соответствии с таблицей 1 создаются точки (рис. 3в). В Flux точка может быть создана:

- как настройка ее координат в СК;
- как изображение существующей точки через геометрическую трансформацию;
- в пределах распространения или выдавливания других единичных объектов.

Сейчас используется первая возможность. Обратим внимание, что в цилиндрической координатной системе первой координатой является радиус, второй — угол поворота в плоскости, третьей — высота.

Созданные точки отображаются в графической зоне, причем, если менялись графические настройки, рекомендуется обратиться к пункту главного меню **View** и выполнить команду **Restore properties of graphic**, далее подключить в пункте меню **Display** отображение точек **Display Points** и номеров точек **Display Point numbers** и, например, координатных осей (**Display Coordinate System**). Увеличение, уменьшение, отображение целого вида или областей возможно с помощью команд зуммирования пункта меню **View**. Для наглядности существует возможность использования команды отображения графических объектов в черном цвете на белом фоне **View, Reverse video**.

Далее точки должны быть соединены линиями.

В Flux линии могут быть созданы:

- вручную (с выбором типа линии как сегмента — отрезка прямой или окружности и введения точек пределов);

- распространением из существующих линий посредством трансформаций;
- выдавливанием из существующих точек посредством трансформаций;
- в пределах распространения или выдавливания из других объектов.

Сегменты — отрезки прямых линий — формируются начальной и конечной точками, при этом направление распространения не важно. Для создания сегментов в папке дерева данных **Geometric entities** выбирается команда **Line** и активируется двойным щелчком, либо используется кнопочная команда **Create a new line** (в главном меню **Geometry** команда называется **Line**). Тип линии на вкладке **Geometric Definition** в открывшемся диалоговом окне — **New Line** установлен по умолчанию (рис. 3г) как **Segment defined by its Starting and Ending Points**. Первый клик левой кнопкой мыши по Point1 в графической зоне указывает на начальную точку, второй клик по Point2 устанавливает конечную точку. Альтернативно пользователь может выбрать две точки следующей линии из открывающихся списков в полях ввода **Points defining segment**.

Затем шаги циклически повторяются для каждой новой линии, причем при вводе второго сегмента вид диалогового окна ввода меняется. В новом окне **New Segment Line...** пользователь может выбирать две точки следующей линии из открывающихся списков полей **Boundary Points** или в графической зоне. Нумерация линий ведется автоматически. Можно увидеть на экране номера созданных линий, если включены пункты меню **Display Display line numbers**.

Для создания дуги окружности используется та же команда **Create a new line**, но на вкладке **Geometric Definition** нужно выбрать **Arc defined by its radius, starting and ending points** как тип линии, при этом необходимо учесть, что выбор стартовой и конечной точек влияет на ориентацию дуги, которая в Flux принята против часовой стрелки (рис. 3г–д). Для рассматриваемой задачи дуги окружностей определяются в СК COORDSYS_ROTATOR в плоскости, параллельной XOY, вокруг оси, параллельной OZ. Альтернативно дуга может быть задана посредством трех точек.

Весь порядок формирования линий представлен в таблице и показан на рис. 3.

Контур зуба строится Flux3D автоматически (кнопка **Build faces**) (рис. 3е).

Принципы автоматического конструирования контуров состоят в следующем:

- 1) Flux вычисляет все существующие поверхности и определяет, какие поверхности должны быть созданы, при этом поверхность определяется тремя точками, соединенными двумя линиями.
- 2) Автоматическое конструирование осуществляется методом замкнутых контуров.

Для построения поверхностей в Flux существует команда **Build, Build faces**, доступная из пункта меню **Geometry**, из дерева данных, с панели инструментов. Достаточно кликнуть

по соответствующей иконке **Build faces**, и внутренняя часть созданного контура в графической зоне закрашивается. Это автоматический контур поверхности, которая может быть цилиндрической, конической или планарной.

Дальнейший процесс геометрического моделирования будет включать трансформации, представляющие собой геометрические функции создания нового объекта из существующих объектов.

- Применимы различные функции, такие как:
- трансляция, определяемая направлением и расстоянием вектора в рабочей системе координат, — параллельный перенос;
 - вращение (rotation), определяемое осью и углом (с опорной точкой pivot point в рабочей СК);
 - сродство или подобие (affinity);
 - винтовая или спиральная трансформация (helix);
 - составные.

Для данной модели интерес представляет угловая трансформация, вызываемая, например, из дерева данных как команда **Transformation** из папки **Geometric tools**. Далее в соответствии со стратегией моделирования создается угловая трансформация TRANSF_ROTATOR_ROT для зуба, определяемая центром в Point1 в качестве опорной точки pivot point и углом 360/TOOTH_K или GAMMA (рис. 3ж). В открывшемся диалоговом окне **New Transformation** задается имя трансформации TRANSF_ROTATOR_ROT, устанавливается угловой тип трансформации **Rotation defined by angles and existing pivot point**, выбирается COORDSYS_ROTATOR как координатная система, а в графической зоне в качестве опорной выбирается Point1, угол вращения относительно оси Z назначается как параметр GAMMA, углы вращения относительно осей Y и X берутся нулевые.

После создания трансформация доступна в дереве данных, но в графической зоне еще нет изменений.

Сразу же могут быть созданы трансляция контура TRANSF_ROTATOR_Z на высоту TOOTH_HGHT (рис. 3м) и трансляция TRANSF_ROTATOR_BAR_x (рис. 3о).

Сейчас можно также сохранить текущую редакцию проекта под именем PATTERN_ROTATOR_3D.FLU — для чего это нужно, станет ясно далее в процессе описания компоновки геометрической модели. Можно также продолжать работать и в проекте ROTOR_3D.FLU, можно как выполнять, так и не выполнять следующие этапы раньше завершения геометрического описания модели.

В данный момент или даже непосредственно перед созданием трансформаций уже можно генерировать сетку домена вычислений и анализировать, какие данные потребуются для описания сетки ротора.

Для генерации сетки в Flux доступны следующие средства регулировки: точки сетки (mesh points) — для регулировки плотности

узлов, линии (mesh lines), регулирующие сетку посредством задания числа и распределения узлов на линиях, генераторы (mesh generators), предназначенные для выполнения деления на конечные элементы посредством контуров и объемов.

Домен вычислений в Flux делится на конечные элементы: узлы, линии, контуры, объемы.

Команда **Mesh point** в папке **Meshing tools** дерева данных распределяет узлы на линиях, основываясь на весе, назначенном для точек — LARGE, MEDIUM, SMALL. Узловое пространство на линиях между двумя геометрическими точками с различными точками сетки определяется интерполяцией. Пользователю предлагается выразить значения точек в миллиметрах.

Команда **Mesh line** распределяет узлы на линиях, основываясь на делении линии на длины. Существуют режим однородного распределения узлов и режим распределения в геометрической прогрессии (неоднородное распределение узлов).

В дереве данных пользователю доступны следующие генераторы сетки:

- 1) общие генераторы:
 - автоматический, который создает треугольные конечные элементы на поверхностях и пирамидальные (в виде тетраэдров) объемные элементы;
 - создающий квадратные элементы на поверхностях и гексаэдры в объеме (mapped);
 - без сетки (none);
- 2) пользовательские (ассоциируемые с трансформацией):
 - связанные (linked) — для того, чтобы накладывать ту же самую сетку на поверхности, связанные посредством геометрической трансформации;
 - выдавливаемые (extrusion) — для воспроизведения той же самой сетки в слоях на доменах, полученных посредством экструзии, объемные элементы при этом — призмы или гексаэдры.

По умолчанию в Flux используется автоматический генератор сетки.

После активации контекста Mesh для контроля узловой плотности вокруг точек командой **Mesh points** создаются три точки

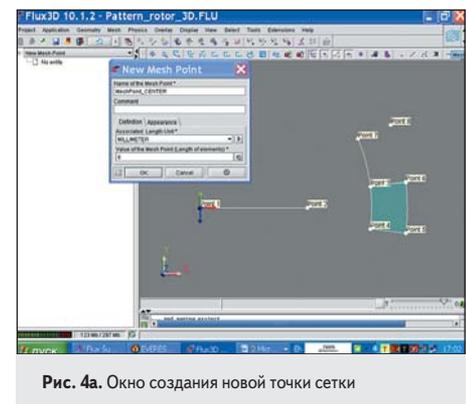


Рис. 4а. Окно создания новой точки сетки

сетки (рис. 4а), их можно выделять цветом на вкладке **Appearance**:

- MeshPoint_CENTER = 6 мм;
- MeshPoint_ROTOR = 4 мм;
- MeshPoint_ROTOR_TOOTH_GAP = 1 мм.

После создания точки отобразятся в дереве данных.

Затем должно быть выполнено назначение трех точек сетки следующим геометрическим точкам:

MeshPoint_CENTER — Point1, MeshPoint_ROTOR — Point2, Point3, Point4, Point7, MeshPoint_GAP — Point5 и Point6 (Point8 исключается из геометрии командой **Delete**).

Для этого в пункте главного меню существует команда **Assign mesh information** и **Assign mesh point to points**. Существуют множественные возможности выбора в контекстном меню, например, для назначения

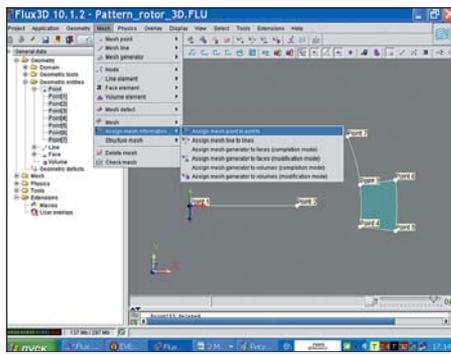


Рис. 4б. Вызов команды назначения точек сетки геометрическим точкам

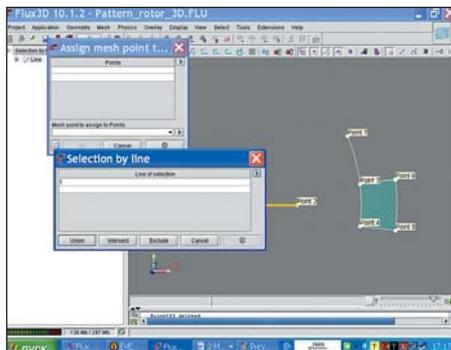


Рис. 4в. Окно выбора точек по линии

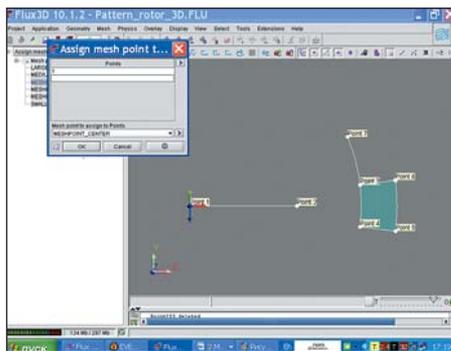


Рис. 4г. Окно назначения точек сетки геометрическим точкам

точки MeshPoint_CENTER — Point1 посредством команды **Selection by line** можно выбрать линию 1, выбрать кнопку **Union**, а затем в открывшемся диалоговом окне исключить точку 2 (рис. 4б–г).

Для наложения сетки на линии, контуры и объемы в пункте главного меню **Mesh** существуют команды **Mesh (Mesh lines, Mesh faces, Mesh volumes, Mesh volumes (old algo)** — бета-версия).

Результат выполнения команды **Mesh lines** для паттерна зуба показан на рис. 4д, **Mesh faces** — на рис. 4е. Для лучшей визуализации процесса программа автоматически переключается к стандартному виду 1 (ручной вызов — команда **View, Standard view 1**).

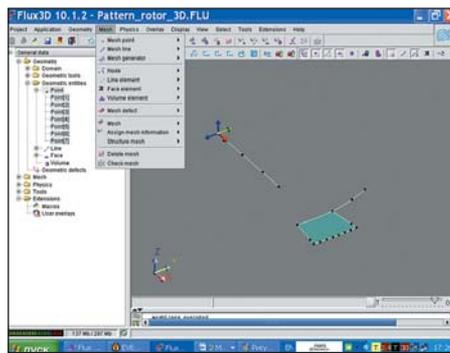


Рис. 4д. Результат выполнения команды Mesh lines для паттерна зуба

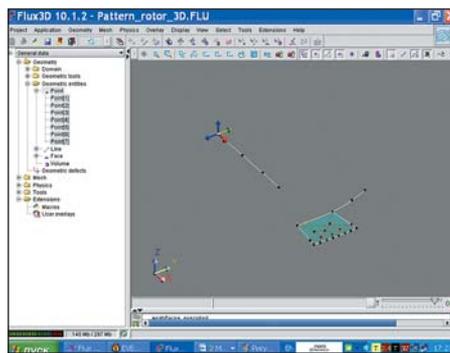


Рис. 4е. Результат выполнения команды Mesh faces для паттерна зуба

Созданные элементы сетки отображаются в дереве данных, их можно удалять или модифицировать. Для этого также существует команда пункта меню **Mesh, Delete Mesh**.

Сетку, как и геометрию, можно проверить на предмет обнаружения дефектов, посредством команды **Mesh, Check Mesh**. Дефекты не обнаружены, и проект можно сохранить и закрыть.

Затем сетка может быть удалена, а проект PATTERN_ROTOR_3D.FLU сохранен и закрыт.

В проекте ROTOR_3D.FLU работа продолжается без закрытия проекта. В любом случае — создавалась ли сетка, или нет, для геометрического описания и генерации сетки модели ротора стратегия предполагает использование вначале трансформации угло-

вого типа для построения контура всего ротора.

В Flux существуют два метода конструирования:

- 1) распространение, или перенос изображения, сгенерированного трансформацией, при котором новый объект не соединяется с исходным;
- 2) экструзия (выдавливание), когда новый объект соединяется линиями с исходным объектом.

Контур зуба и линия 6 распространяются посредством угловой трансформации TRANSF_ROTOR_ROT (рис. 3з–к): это действие необходимо выполнить 12 (но не TOOTH_K) раз. Для выполнения этой команды сетка должна быть удалена, но точки сетки и их назначение могут быть сохранены.

Для осуществления распространений позиционируем курсор на пункте **Propagate** меню **Geometry** и кликом по команде **Propagate faces** или **Propagate lines** (рис. 3и). В качестве опции распространения для контура и везде, где предлагается, рекомендуется выбирать **Add faces and associated linked mesh generator**. Результат выполнения команды, задействованной на рис. 3к, отобразится в графической зоне, при этом автоматически сгенерируется новое окно с установленными ранее параметрами.

Та же трансформация TRANSF_ROTOR_ROT 12 раз с той же опцией построения **Add faces and associated extrusion mesh generator** применяется для выдавливания линии 1 посредством выполнения команды **Extrude, Extrude lines**, Line1 при этом выбирается в графической зоне (рис. 3к–л). Результат экструзии линии отобразится в графической зоне и дереве данных.

Окружность, состоящая из дуг радиусом TOOTH_IR, соединяющих крайние точки соседних зубьев, также требуется 12 раз распространить посредством трансформации TRANSF_ROTOR_ROT (команда **Propagate, Propagate lines**) и автоматически построить недостающий контур (рис. 3и–л). Любые контуры, которые не были автоматически сгенерированы программой на данном этапе, необходимо достроить автоматическим конструированием через пункт меню **Geometry, Build, Build faces**. Один клик по соответствующей кнопке панели инструментов, и отсутствующий контур будет достроен.

Сейчас можно проверить геометрию модели командой **Check Geometry** (рекомендуется выполнять непосредственно перед созданием объемов). Если геометрических дефектов программа не обнаруживает, в зоне истории можно увидеть надпись **Geometry is correct**.

Наконец, следует этап выдавливания контура посредством трансформации TRANSF_ROTOR_Z, применяемой для экструзии всех поверхностей.

В пункте меню **Geometry** последовательно выбираются подпункты **Extrude, Extrude faces**,

в открывшемся диалоговом окне **Extrude faces** из списка выбираются контуры для выдавливания (удобнее выбрать сразу все, кликнув по пункту контекстного меню **Select all**), однократная стандартная трансформация для применения TRANSF_ROTOR_Z (1 в поле ввода **Number of times to apply the transformation**) с подключением объемов и ассоциированного генератора сетки (**Add volumes and associated extrusion mesh generator**).

Две трансформации — трансляции TRANSF_BAR_1 и TRANSF_BAR_2 создаются и применяются для выдавливания контура вала ротора.

Отметим, что если при определении СК, параметров, трансформации была допущена ошибка, после импорта исправлять ее можно будет в новом файле, в который будет выполняться импорт, но синхронизация проектов не поддерживается.

Наконец, перед импортом геометрии ротора в финальный проект координатную систему COORDSYS_ROTOR рекомендуется сместить вниз на высоту TOOTH_HGHT/2.

Рекомендуется сохранить данный проект, но можно его не закрывать.

Если создание и назначение точек сетки не выполнялось одновременно с геометрическим описанием модели, его можно выполнить сейчас. Для выполнения назначения точек в дереве данных стандартными средствами выбора, которыми являются клик левой клавиши мыши по первому объекту и клик по второму объекту вместе с удержанием нажатой клавиши Shift или CTRL, могут быть выбраны последовательно и сделаны невидимыми с контекстной командой **Set invisible** все объемы, все контуры, кроме Face 1, все линии, кроме Line1–Line7, и все точки, кроме Point1–Point7. С оставшимся контуром паттерна зуба выполняется назначение точек сетки геометрическим точкам, как описано выше, а затем с контекстной командой **Set visible** видимость всем объемам, контурам, линиям и точкам может быть возвращена.

Для установки свойств видимости рекомендуется редактировать выбранные объекты массивами с командой **Edit array** (рис. 4ж).

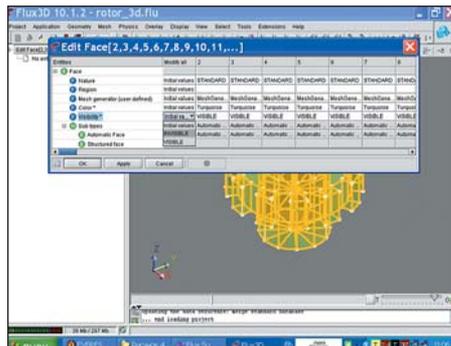


Рис. 4ж. Модификация свойств видимости выбранных объектов (поверхностей)

Об этой команде необходимо сказать несколько слов. Данная команда вызывается в Flux3D как контекстная для любых типов объектов, в том числе и для геометрических дефектов. Описанное выше скрытие, например, поверхностей, в Flux является одним из средств коррекции дефектов, вторым является игнорирование объектов во время построения объемов.

Чтобы позволить пользователю модифицировать принятие во внимание единичных объектов, когда строятся поверхности и объемы, специальные атрибуты, называемые nature, ассоциируются с точками, линиями и поверхностями.

Для атрибута nature любого объекта допускается устанавливать следующие функции:

- STANDARD;
- IN_AIR;
- NO_EXIST (несуществующий).

Возможность модификации атрибутов nature также доступна пользователю именно с командой **Edit array** (рис. 4з).

Но в данной модели в результате выполнения команды **Check geometry** из пункта меню **Geometry** дефекты не обнаружены, поэтому для значений nature всех объектов должно быть указано значение STANDARD.

Flux автоматически назначает точки сетки всем геометрическим точкам модели, линии MeshLineLinked_TRANSF_ROTOR_ROT — геометрическим линиям, созданным в результате выполнения соответствующих команд распространения и выдавливания с подклю-

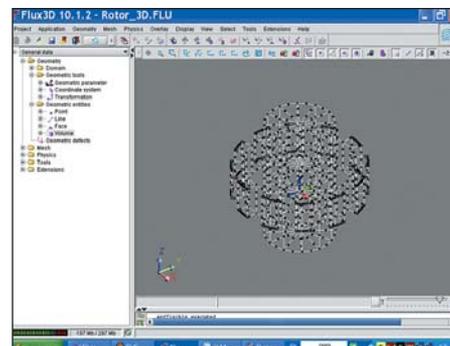


Рис. 4з. Результат выполнения команды Mesh lines для ротора

чением автоматически создаваемых генераторов MeshGeneratorExtrusive_TRANSF_ROTOR_BAR_1, MeshGeneratorExtrusive_TRANSF_ROTOR_BAR_2, MeshGeneratorExtrusive_TRANSF_ROTOR_ROT, MeshGeneratorExtrusive_TRANSF_ROTOR_Z, MeshGeneratorLinked_TRANSF_ROTOR_ROT. Все эти объекты могут быть обнаружены в дереве данных в папке **Mesh**, **Meshing Tools**. Результаты выполнения команд **Mesh lines** и **Mesh faces** для всего ротора показаны на рис. 4з–и, существует возможность генерирования сетки и для объемов (**Mesh**, **Mesh volumes**), а также генерирование элементов второго порядка (**Generate second order elements**). Применение перечисленных команд генерирования сетки для модифицированной версии ротора показано на рис. 4к–м.

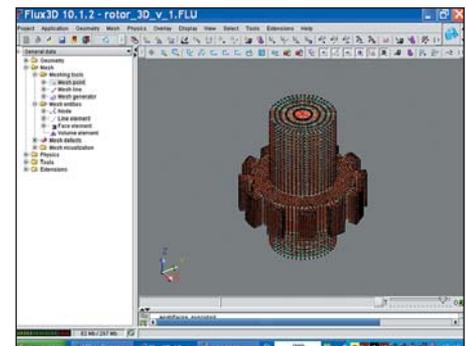


Рис. 4к. Результат выполнения команды Mesh faces для версии ротора с модифицированной сеткой

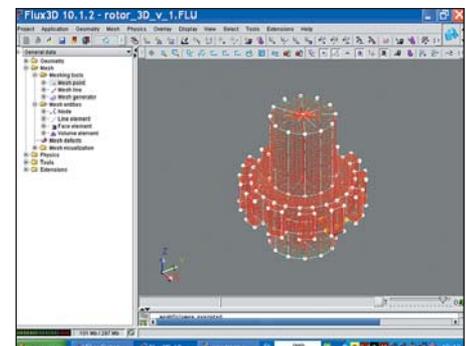


Рис. 4л. Результат выполнения команды Mesh volumes для ротора с модифицированной сеткой

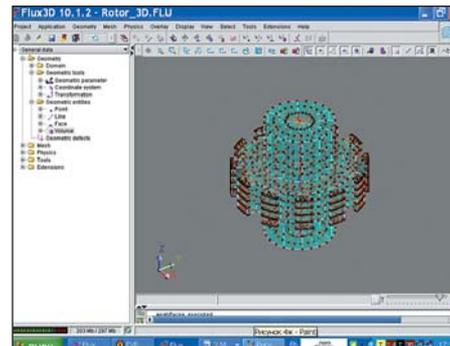


Рис. 4и. Результат выполнения команды Mesh faces для ротора

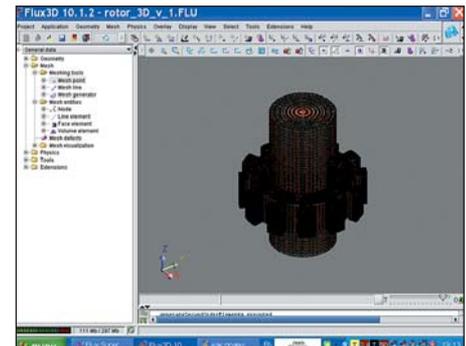


Рис. 4м. Результат выполнения команды Generate second order для ротора с модифицированной сеткой

Объекты датчиков могут быть добавлены в данный проект, но, согласно ранее выбранной стратегии, проект должен быть сохранен и закрыт, а сетка удалена. ■

Продолжение следует

Литература

1. Сысоева С. Развитие концепции математического и расчетного моделирования автомобильных датчиков скорости/положения // Компоненты и технологии. 2007. № 12.
2. Сысоева С. Датчики скорости автомобиля. Анализ конструкций и перспективы развития // Компоненты и технологии. 2004. № 7.
3. Сысоева С. Датчики скорости автомобиля. Анализ конструкций и перспективы развития (окончание, начало в № 7'2004). // Компоненты и технологии. 2004. № 8.
4. Сысоева С. Рекомендации производителям автомобильных цифровых датчиков скорости и положения. Часть 1. Постановка задач и общие конструкторские рекомендации // Компоненты и технологии. 2006. № 9.
5. Сысоева С. Новые концепции датчиков скорости/положения // Компоненты и технологии. 2008. № 1.
6. Сысоева С. Датчики близости/положения/расстояния. Важные обновления и дальнейшие перспективы // Компоненты и технологии. 2008. № 3.
7. Захаров И. С., Яцун С. Ф., Сысоева С. С. Исследование статических эффектов влияния обратного магнитного смещения в датчиках скорости автомобиля // Известия. Курский ГТУ. 2004. № 1 (12).
8. Захаров И. С., Яцун С. Ф., Сысоева С. С. Влияние частоты вращения ротора на функциональные свойства датчика скорости автомобиля // Телекоммуникации. 2004. № 5.
9. Захаров И. С., Яцун С. Ф., Сысоева С. С. Исследование параметрической чувствительности датчика скорости автомобиля в условиях погрешностей его монтажа // Телекоммуникации. 2004. № 6.
10. Бесконтактный датчик скорости автомобиля. Патент РФ № 35441 на полезную модель по заявке № 2003127267 от 08.09.2003, МПК G 01 P3/488, зарегистрировано в Гос. реестре полезных моделей РФ 10.01.2004 / И. С. Захаров, С. Ф. Яцун, С. С. Сысоева.
11. Бесконтактный датчик скорости автомобиля, встраиваемый в коробку передач. Патент РФ № 36894 на полезную модель по заявке № 2003132947 от 11.11.2003, МПК G 01 P3/488, зарегистрировано в Гос. реестре ПМ РФ 27.03.2004 / И. С. Захаров, С. Ф. Яцун, С. С. Сысоева.
12. Сысоева С. С. Экспериментальная установка для исследования виброустойчивости датчиков скорости автомобиля // Вибрационные машины и технологии: Сб. науч. тр. / Курский ГТУ. Курск, 2003. 450 с.
13. Захаров И. С., Яцун С. Ф., Сысоева С. С. Бесконтактный датчик скорости автомобиля. Патент на изобретение № 2260188 по заявке № 2004102133/28 (002114) от 26.01.2004. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений 10.09.2005.
14. Захаров И. С., Яцун С. Ф., Сысоева С. С. Бесконтактный датчик скорости автомобиля. Патент на изобретение № 2270452 по заявке на изобретение № 2004102306/28 от 26.01.2004. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений 20.02.2006.
15. Сысоева С. Автомобильные цифровые магнитоуправляемые датчики угловой скорости и углового положения зубчатого ротора // Электронные компоненты. 2004. № 3.
16. Захаров И. С., Яцун С. Ф., Сысоева С. С. Разработка и исследование перспективных конструкций бесконтактных датчиков скорости автомобиля // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Материалы III научно-технической конференции. Ч. 1. Пенза: ПГУАС, 2004.
17. Сысоева С. Интеллектуальные автомобильные датчики положения/скорости. Пути оптимизации. Часть 1 // Современная электроника. 2007. № 9.
18. Сысоева С. Интеллектуальные автомобильные датчики положения/скорости. Пути оптимизации. Часть 2 // Современная электроника. 2008. № 1.
19. Сысоева С. Сравнительный анализ возможностей применения датчиков Холла в автомобильных системах электрического рулевого управления // Компоненты и технологии. 2007. № 5.