Практический курс моделирования магнитоуправляемых датчиков положения и скорости на базе конечно-элементного программного пакета FLUX
Часть 2. Магнитостатическое моделирование компонентов рабочей зоны датчика

(продолжение)

Светлана Сысоева (Москва)

Во второй части статьи демонстрируются моделирующие возможности пакета FLUX 10.1.2 в реализации этапов магнитостатического расчёта датчика скорости ферромагнитного зубчатого ротора.

Физическое описание модели

Для физического описания датчика ферромагнитного зубчатого ротора используются два основных материала, ответственные за работоспособность устройства:

- SmCo – гомогенный редкоземельный материал постоянного магнита с анизотропными свойствами;
- STEEL – магнитомягкая сталь ротора с нелинейной характеристикой $B(H)$.

Физическое магнитостатическое моделирование начинается с пересохранения созданного ранее проекта под именем PHYS_MAG_SYS_REF_3D.FLU и определения физического применения как 3D Magneto Static посредством вызова из меню *Application* команды *Define* (см. рис. 14а). МКЭ-функции для скалярных и векторных потенциалов поля в пакете Flux для этого применения выбираются автоматически. После активации физического применения становится доступным физический контекст описания модели. По команде меню *Physics*, *Material*, *New* (кнопка *Create a new material*) (см. рис. 14б, 14в) создаются материалы SMCO и STEEL.

Пусть магнит намагничен вдоль X-оси в координатной системе COORDSYS_MAG_SENSOR и характеризуется остаточной магнитной индукцией B_r = 0,9 Тл. Коэффициенты относительной магнитной проницаемости μ_r для оси X составляют 1,15, для осей Y и Z – по 1 (см. рис. 14б). Положим, что материал STEEL имеет следующие характеристики (см. рис. 14в): начальный коэффициент относительной проницаемости – 3500; поле насыщения – 1,75 Тл; регулировочный коэффициент кривой Knee adjustment – 0,075. В дальнейшем эти значения могут быть ведены в качестве параметров, с тем чтобы их изменять и контролировать перед запуском сценария решения.

Объёмы MAGNET и ROTOR, а также AIR, необходимые для создания физического описания, создаются командой *New volume region* (см. рис. 14г), вызываемой из меню *Physics*, *Volume region*, *New*, кнопкой *Create a New Region* или из дерева данных, строка *Volume region*. Затем физические объёмы назначаются геометрическим объёмам (*Physics*, *Assign regions to geometric entities*, *Assign regions to volumes* (*completion mode, modification mode*)) (см. рис. 14д).

Для лучшей визуализации процесса назначения объёмов магнита и ротора целесообразно отключить видимость объёмов (а также поверхностей, линий и точек) бесконечного бокса, выделив в дереве данных объёмы с 8-го по 14-й и активировав для них контекстную команду *Set Invisible*. Объёмный регион AIR назначается этим объёмам бесконечного бокса, которые выбираются в дереве данных с применением клавиш Ctrl и Shift. Геометрические объёмы для назначения их объёмам MAGNET и ROTOR могут выбираться и непосредственно в графической зоне.

В координатной системе объёмного региона COORDSYS_MAG_SENSOR также выполняется ориентация магнита командой *Orient material for volume region*, вызываемой посредством кнопки панели инструментов или из меню *Physics*, *Material* (см. рис. 14е). На этом работа с препроцессором, т.е. геометрическое, конечно-элементное и физическое описание модели, завершается. Можно сохранить текущий проект.

Решение образцовой модели

Решение образцовой модели, на создание которой было затрачено некоторое время, выполняется в программе *Flux3D* очень быстро. Для

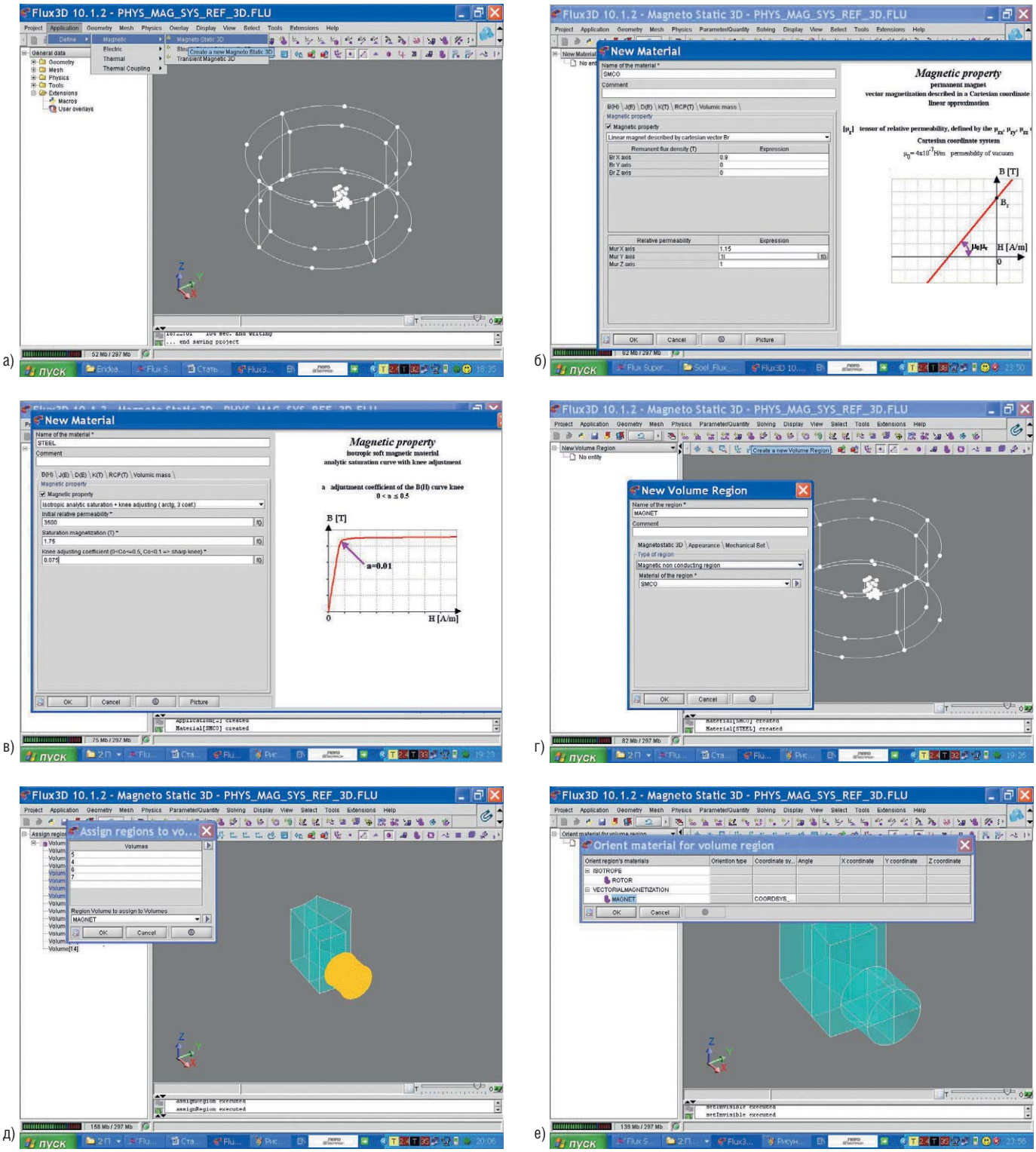


Рис. 14. Этапы физического описания сборки магнитной системы датчика

(а) Определение физического применения как магнитостатического; (б) создание нового материала магнита; (в) создание нового ферромагнитного материала; (г) окно для создания новых объёмных регионов; (д) окно для назначения объёмных регионов геометрическим объёмам; (е) ориентация магнита в координатной системе

запуска сценария образцового решения предназначена команда *Solve*, вызываемая из пункта меню *Solving*. В диалоговом окне запуска команды пользователю предлагается возможность сохранения результатов решения в новом проекте, например, MAG_SYS_SOLVE_REF_3D.FLU (см. рис. 15а). Пересохранение выполняется автоматически; о результатах выполнения команды пользователю сообщается в зоне истории и в левом нижнем углу экрана (на рисунке 15б показан также вид со стрелками, изображающими векторную модель поля магнита, доступными после решения с командой меню *Physics*, *Display arrows on magnet*).

Постобработка результатов вычислений

В пакете Flux существует мощная поддержка для вычислений и отображения результатов. Все команды становятся доступны посредством их вызова из пункта главного меню *Post-processing* или активации соответствующей кнопки панелей инстру-

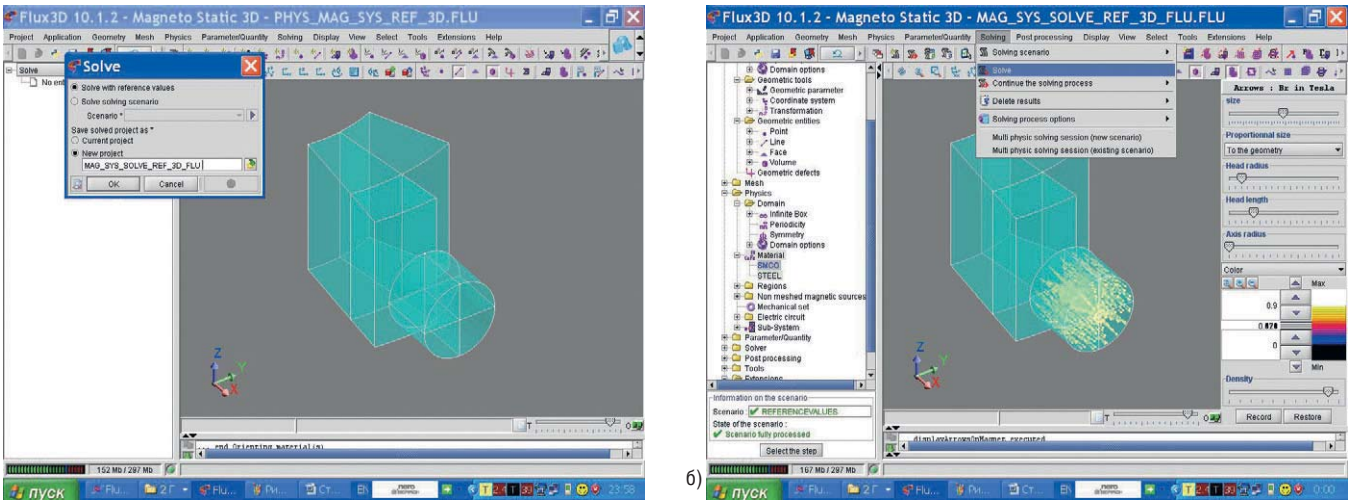


Рис. 15. Иллюстрация процесса решения образцовой модели

(а) Окно запуска решения образцового сценария; (б) вид окна программы Flux3D с результатами решения образцового сценария и визуализированной стрелками векторной моделью поля магнита

ментов. Контекст постобработки активируется программой Flux автоматически.

Команда *Isovalues on volume regions* позволяет выбрать объёмы для визуализации, задать скалярную формулу Mod(*B*) (см. рис. 16а) и получить изображение скалярных результатов решения (см. рис. 16б).

Команда *Arrows in volume regions* в диалоговом окне ввода (см. рис. 16в) позволяет также выбрать объёмы для визуализации, задать векторную формулу B и получить изображение векторных результатов решения (см. рис. 1г). Для скрытия или отображения стрелок или изокривых существуют соответствующие команды меню *Postprocessing*, *Isovalues*, *Display or hide isovalues* и *Arrows*, *Display or hide arrows*.

В пакете Flux также может быть создана 2D-сетка, параллельная плоскости XY, как средство поддержки вычислений (команда меню *Postprocessing*, *2D grid*, *New*) (см. рис. 16д).

Скалярные величины магнитной плотности потока вычисляются на 2D-сетке и отображаются как изозначения в цветовых оттенках с той же формулой Mod(*B*). Плотность магнитного потока также может быть вычислена в выбранной точке (см. рис. 16е). Например, можно рассчитать плотность магнитного потока в точке с зазором 0,5 мм от поверхности магнита или любой другой точке.

Вычисление и отображение плотности магнитного потока производится также и на плоскостях срезов. Скалярные величины плотности магнитного потока вычисляются на плоскостях среза и отображаются также через графики изозначений цветовых оттенков.

Возможно также вычисление изозначений относительной магнитной проницаемости в объёмных регионах. Скалярные параметры вычисляются в выбранных объёмных регионах и отображаются в цветовых оттенках изозначений. Для этого будет использоваться та же команда *Isovalues on volume regions*, но с формулой Mur.

Задачи физической параметризации

Для физического параметризованного вычисления рекомендуется создать новый проект на базе образцового проекта. На этапе физической параметризации:

- создаются входные и выходные параметры;
- модифицируются физические свойства;
- создаётся датчик;
- определяется сценарий решения;
- решается проект.

В рамках данного проекта необходимо исследование магнитной индукции как основного входного параметра (остаточная намагниченность магнита), после чего редактируются свойства материалов магнита и стали. Чтобы вычислять магнитный поток, в пакете Flux также может быть создан виртуальный датчик.

Сценарий решения перед его запуском определяется как физический, параметризованный. Определяются входные параметры *I/O parameter* и для каждого из них задаются диапазон и шаг. Далее вычисляются и отображаются изозначения скалярных величин магнитной плотности в выбранных объёмных регионах с формулой Mod(*B*), векторные величины плотности магнитного потока в выбранных объёмных регионах, которые отображаются в виде стрелок. Создаётся 2D-сетка для вычислений и отображений результатов, локализованная в области воздушного зазора, вычисляются и отображаются значения плотности магнитного потока на 2D-сетке с формулой Mod(B) (см. рис. 17а). Программа позволяет построить 2D-кривую расчётной плотности магнитного потока в зависимости от входного параметра I/O parameter, который для сценария решения устанавливает пользователь (см. рис. 17б).

Задачи геометрической параметризации

В геометрической параметризации изменяется один из каких-либо параметров геометрии, для которого указывается диапазон и шаг изменения. Вновь выполняется модификация физических свойств, создаётся датчик, определяется сценарий решения и запускается сценарий решения и новый проект.

Затем снова вычисляются и отображаются изозначения магнитной плотности потока в объёмных регионах (см. рис. 18а), вычисляются и

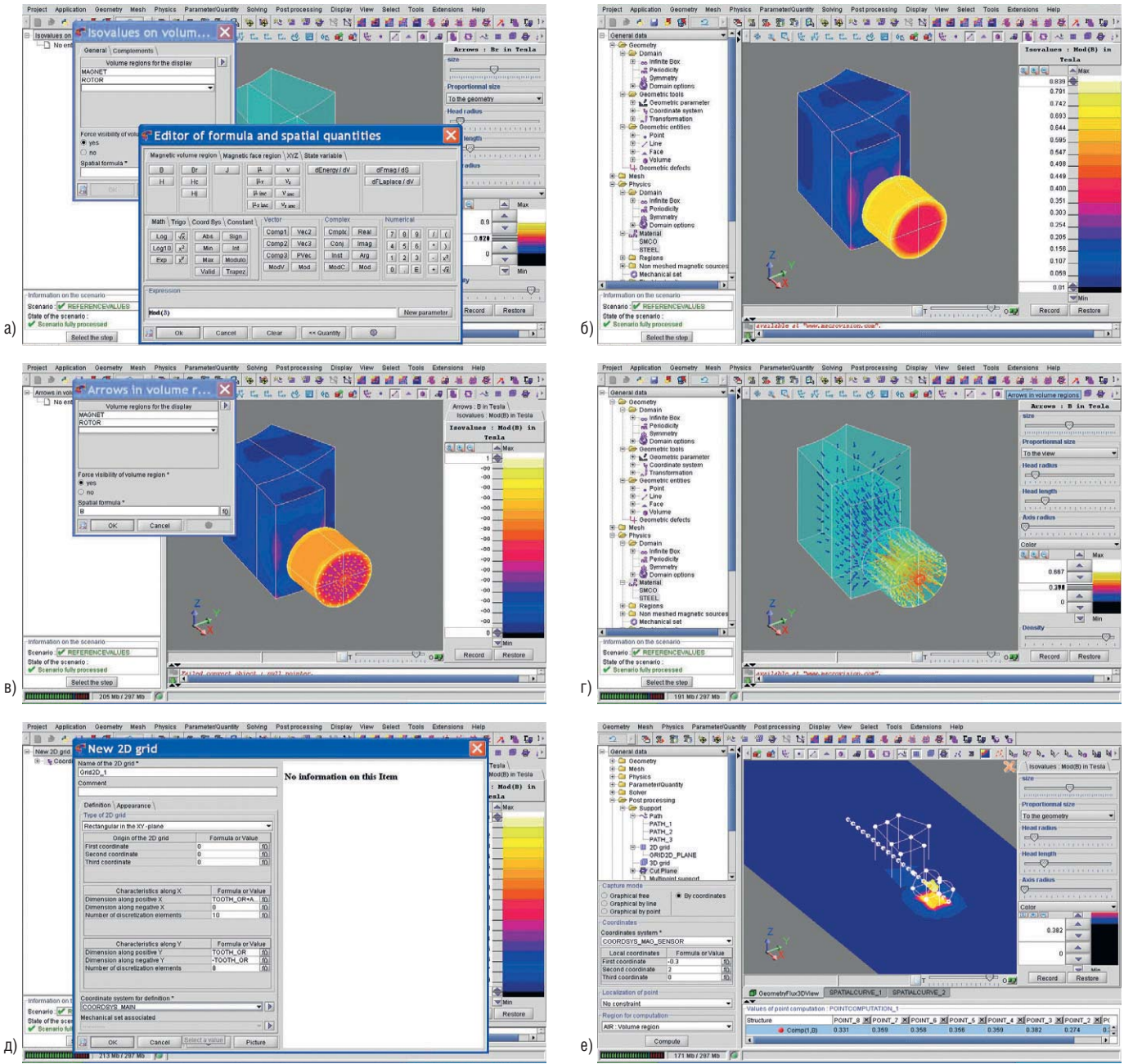


Рис. 16. Демонстрация средств постобработки результатов вычислений в пакете Flux на примере образцовой модели

(а) Окно выполнения команды *Isovalues on volume regions* вместе с окном редактора формул; (б) изображение скалярных результатов решения; (в) изображение векторных результатов решения вместе с окном выполнения команды *Arrows in volume region*; (г) изображение векторных результатов решения с отключенными скалярными результатами; (д) окно для создания прямоугольной 2D-сетки; (е) вычисления плотности магнитного потока в выбранной точке

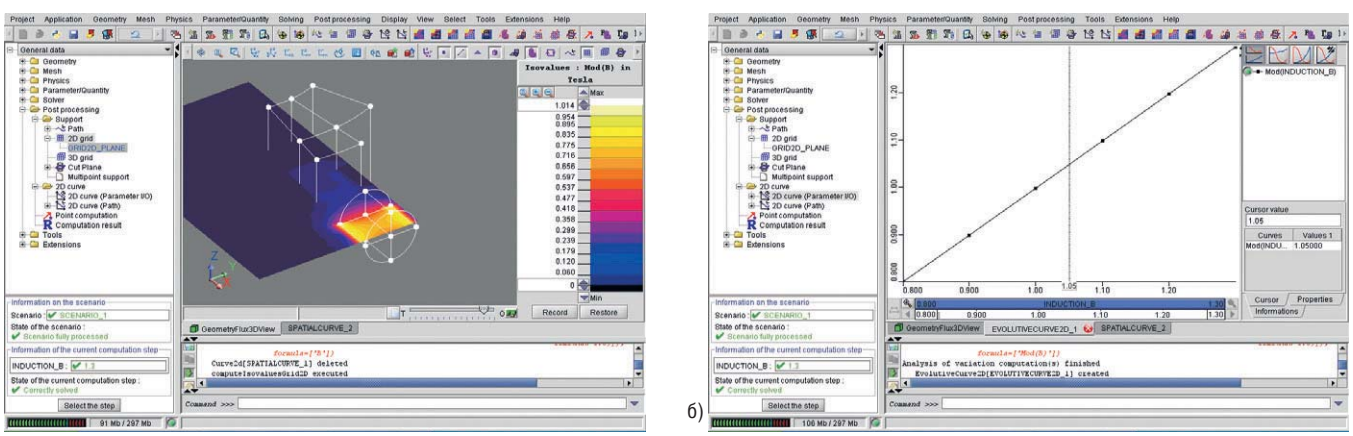
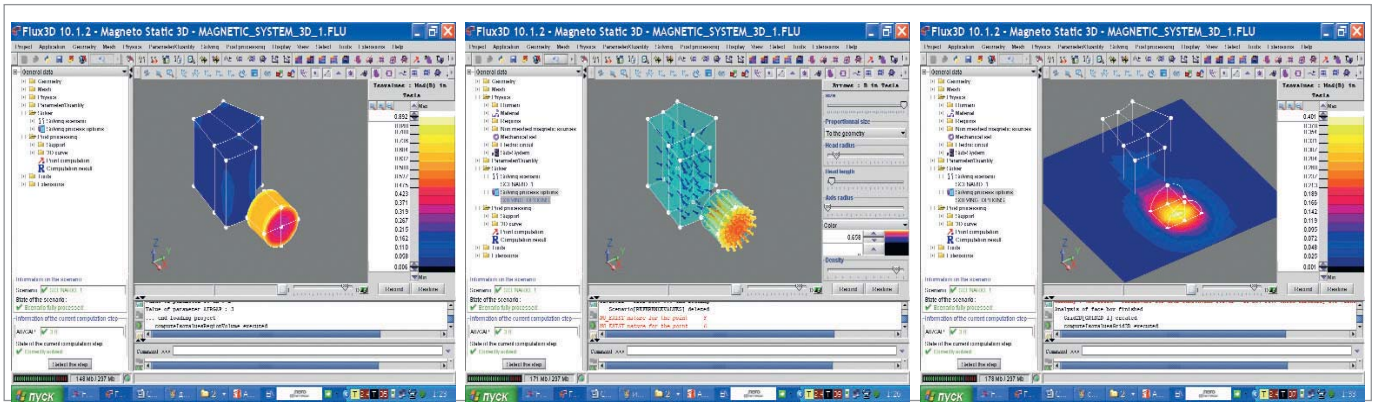


Рис. 17. Демонстрация средств постобработки результатов вычислений в пакете Flux на примере физического параметризованного вычисления

(а) Изображение скалярных результатов решения на 2D-сетке;

(б) 2D-кривая плотности магнитного потока в зависимости от входного параметра



а) б) в)

Рис. 18. Демонстрация средств постобработки результатов вычислений в пакете Flux на примере геометрического параметризованного вычисления

(а) Изображение скалярных результатов решения; (б) изображение векторных результатов решения; (в) изображение скалярных результатов решения на 2D-сетке

отображаются стрелками векторы плотности магнитной индукции в объёмных регионах (см. рис. 18б), создаётся 2D-сетка, вычисляются и отображаются изозначения магнитной плотности потока на 2D-сетке (см. рис. 18в), выполняется построение 2D-кривой датчика в зависимости от параметра *I/O parameter*.

Заключение

Для знакомства с сегодняшним уровнем конечно-элементных пакетов CAD/CAE, новейшим представителем которого является Flux v.10.1.2 Cedrat (www.cedrat.com), рассмотрение концепций и основных этапов магнитостатического моделирования датчика ферромагнитного зубчатого ротора, выбранного в качестве примера, является вполне достаточным. Созданные рисунки и исследованная образцовая модель далее могут быть использованы для статической и динамической оптимизации устройства, но в качестве практической задачи это является темой следующих публикаций.

Продолжение следует