



УДК 537.87

doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-2-13



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Существующие программные продукты для анализа электромагнитного поля

Святослав Павлович Андреев

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
kipra@pnzgu.ru

Алексей Рашидович Петрунин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
yttrium-90@yandex.ru

Павел Геннадьевич Андреев

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
apg_58@mail.ru

Игорь Русланович Васильев

«МИРЭА – Российский технологический университет», Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78

Никита Дмитриевич Кошелев

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
spellbinderrus@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены программные продукты для анализа электромагнитного поля. Приведены основные пакеты, их назначение, область применения, положительные и отрицательные стороны и особенности использования.

Ключевые слова: электромагнитное поле, программы, программные пакеты, моделирование электромагнитного поля, преимущества, недостатки

Для цитирования: Андреев С. П., Петрунин А. Р., Андреев П. Г., Васильев И. Р., Кошелев Н. Д. Существующие программные продукты для анализа электромагнитного поля // Инжиниринг и технологии. 2023. Т. 8 (2). С. 1–12. doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-2-13

Software products for the analysis of the electromagnetic field

Svyatoslav P. Andreev

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
kipra@pnzgu.ru

Alexey R. Petrunin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
yttrium-90@yandex.ru

Pavel G. Andreev

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
apg_58@mail.ru

Igor R. Vasiliev

MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia

Nikita D. Koshelev

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
spellbinderrus@gmail.com

Abstract. Software products for the analysis of the electromagnetic field were considered. the main packages, their purpose, scope, positive and negative sides and features of use have been described.

Keywords: electromagnetic field, programs, software packages, electromagnetic field simulation, advantages, disadvantages



For citation: Andreev S.P., Petrunin A.R., Andreev P.G., Vasiliev I.R., Koshelev N.D. Software products for the analysis of the electromagnetic field. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2023;8(2):1–12. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-2-13

Введение

На данный момент нас всюду (дома, на улице) окружают электромагнитные поля (ЭМП), в некоторых случаях они представляют опасность в виде воздействия на организм и на электронные средства (ЭС). В случае с ЭС и живыми организмами такие воздействия могут иметь накопительный эффект, вызывать сбои в работе, нарушение работоспособности и необратимые последствия [1–3]. Чтобы уменьшить риск отрицательного воздействия на ЭС, на этапах проектирования, производства и эксплуатации ЭС принимаются меры по учету электромагнитного поля. Для использования этих мер необходим расчет характеристик ЭМП. Это позволит обеспечить нормальное функционирование изделий с учетом электромагнитного, теплового и других видов воздействий [4–7]. Существуют программные пакеты, которые значительно упрощают задачи анализа электромагнитного поля [8–14]. Рассмотрим некоторые из них.

Обзор программ. CST StudioSuite – это такой программный продукт, который предназначен для моделирования и решения электромагнитных задач в диапазоне частот от низких значений до микроволновых и даже оптических значений частот. Кроме того, возможно решение тепловых задач и некоторых задач механической направленности.

Можно выделить семь основных приложений данного продукта или, как их еще называют, студий.

Первое приложение – MicrowaveStudio. Оно предназначено для решения радиочастотных и микроволновых задач, а также задач, связанных с конструкциями антенн.

Второе приложение – EM Studio – необходимо при решении низкочастотных задач, а также задач электростатики, магнитостатики и квазистатических процессов.

Третье приложение – DesignStudio. Это приложение для выполнения схематического процесса проектирования электронных схем, а также для объединения результатов работы других студий для сборки системы в единый проект.

Четвертое приложение – ParticleStudio. Служит при моделировании процессов движения частиц и пучков. Например, таких как пучки электронов и частиц в электронной пушке, микроволновых трубках и т.п.

Пятое приложение – MPHYSISCS Studio. Оно поможет при создании симуляции основных механических и тепловых физических процессов, используемых в различных областях их применения.

Шестое приложение – CableStudio – необходимо при проектировании и моделировании кабелей или жгутов, как внутри блочных конструкций, так и межблочных конструкций изделий.

Седьмое приложение – PCB Studio. Это полноценное приложение разработки и моделирования как односторонних, так и многослойных печатных плат.

В дополнение к S-параметрам программа имеет обширный интерфейс, в котором можно просматривать карты электромагнитных полей, плотность тока, а также диаграммы направленности, усиления и эффективности. Пример работы (рис. 1–5).

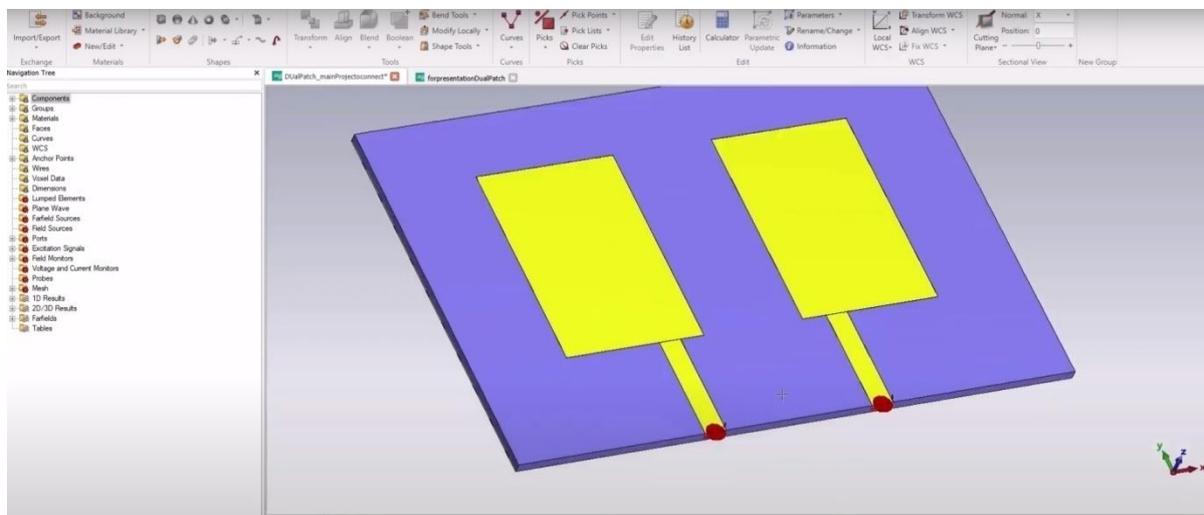


Рис. 1. Создание 3D-модели направленной антенны

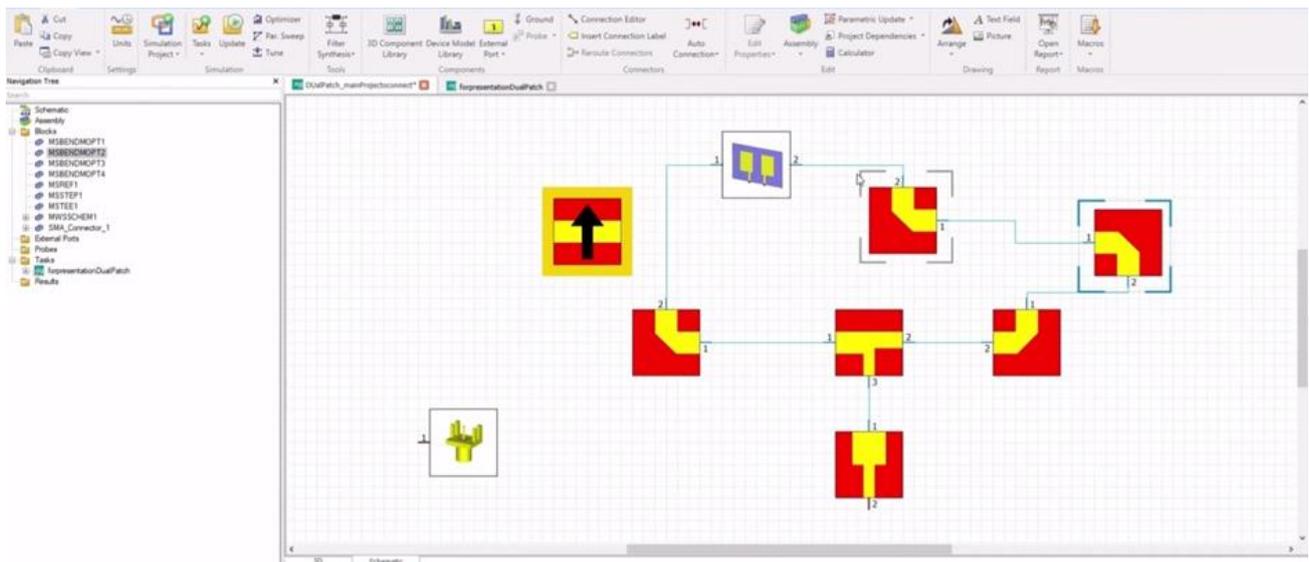


Рис. 2. Состав устройства из системы из двух антенн

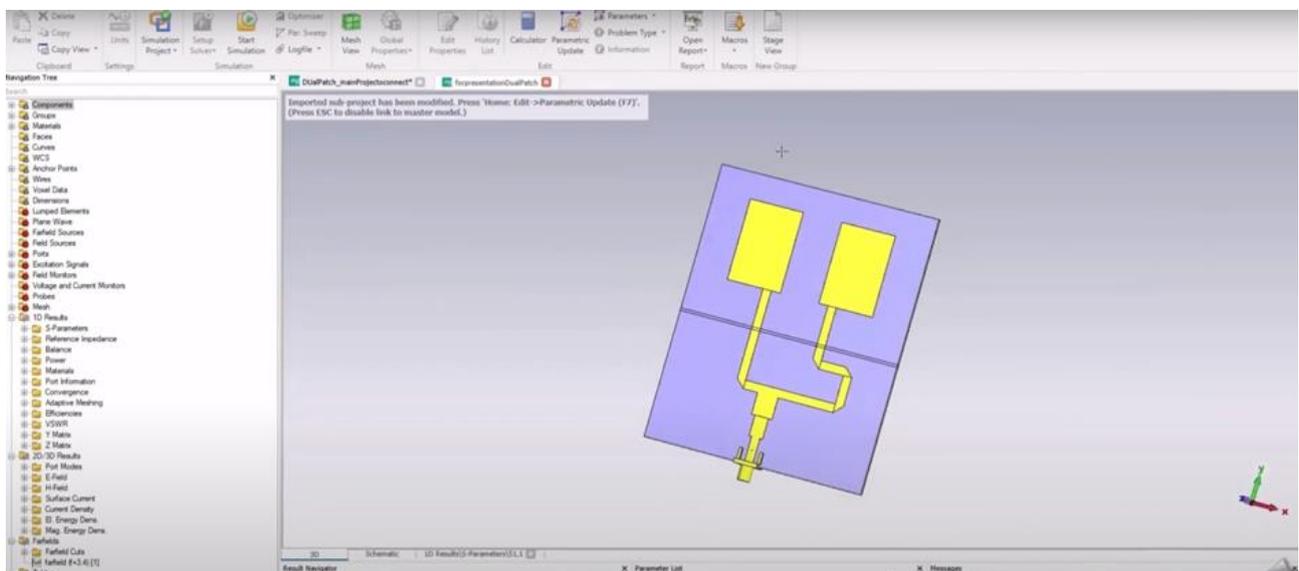


Рис. 3. Проектирование и моделирование линий связи

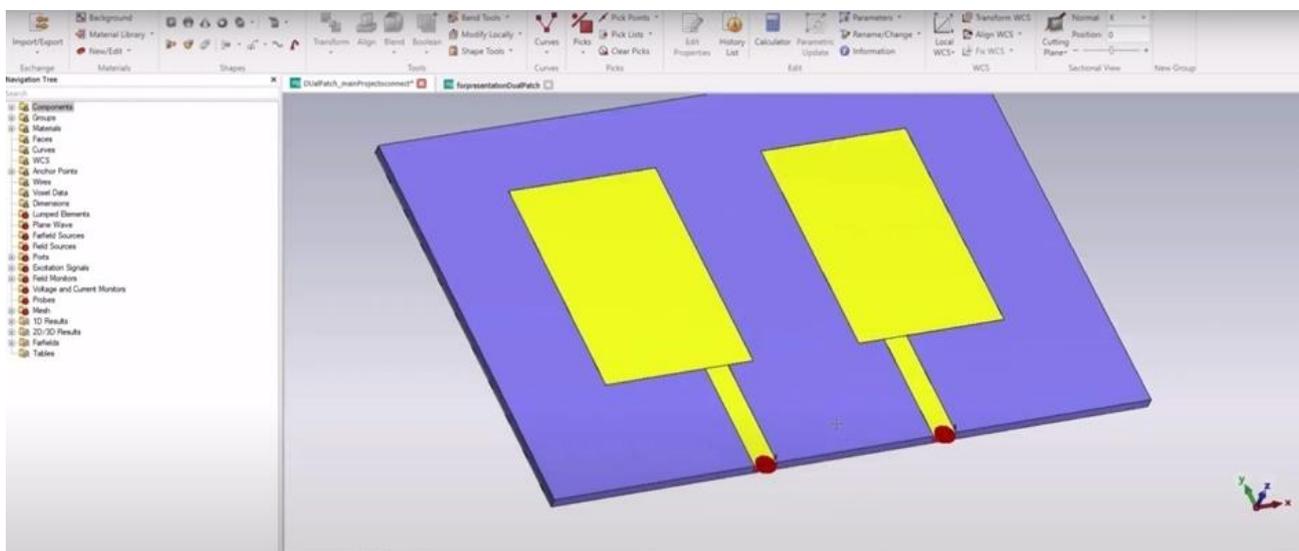


Рис. 4. Перенос в формат 3D

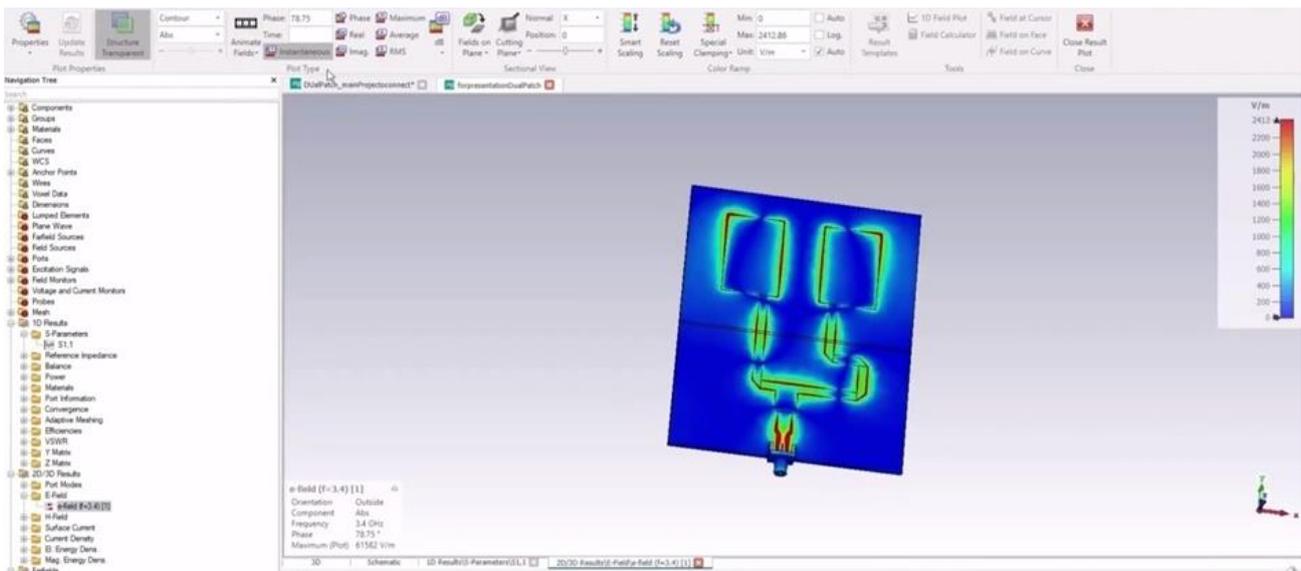


Рис. 5. 3D-отображение электромагнитного поля

Можно выделить следующие основные преимущества:

- наличие полного набора инструментов для решения вопросов, связанных с 3D EM моделированием;
- существующая полноценная среда построения проектов;
- наличие достаточно большого числа средств проведения анализа на различных этапах проекта, в том числе на мультифизическом уровне;
- возможность выполнения с высокой точностью дискретизации структуры моделируемых объектов;
- наличие большого количества чисел вычислителей процессов;
- возможность выполнения высокопроизводительных процессов, в том числе и удаленных облачных вычислений;
- применение автоматической оптимизации с минимальным количеством настроек;
- интуитивно понятный, дружелюбный интерфейс пользователя;
- возможность выполнения интеграции различных потоков данных при проектировании;
- наличие исследования и моделирования фильтров сверхвысоких частот;
- возможность выполнения моделирования фазированных антенных решеток;
- наличие качественного взаимодействия вычислителей и гибридного моделирования узлов и процессов;
- наличие технологии SAM – технологии моделирования составных проектов.

К недостаткам пакета программ можно отнести:

- достаточно узкую специализацию: расчеты требуемого на разведенных платах;
- рассчитывает очень точно. Можно по в.ч. просчитать усилительные схемы, но печать не выводит.

Другим программным продуктом является COMSOL Multiphysics. Данный программный продукт позволяет выполнить моделирование различных конструкций, устройств и процессов во всех областях инженерии, производства и научных исследований. При этом реализация проекта начинается с определения геометрии физического тела, описания необходимых граничных условий и свойств применяемых материалов или начальных данных рассматриваемого физического процесса. Дальнейшее моделирование заключается в последовательном применении соответствующих моделей пакета до получения необходимой точности результатов исследования. При этом COMSOL Multiphysics возможно междисциплинарное моделирование или моделирование в рамках конкретной научно-практической задачи.

В модуле AC/DC пакета COMSOL Multiphysics доступен целый набор физических интерфейсов группы MagneticFields, которые позволяют анализировать и оптимизировать работу и характеристики различных контуров с током, трансформаторов, электрических машин, вихретокового оборудования и других подобных устройств и систем в статике и динамике.



В моделях можно эффективно:

- описать различные конфигурации проводников, в том числе через условие Coil;
 - задать нелинейные материалы, в том числе постоянные магниты, ферриты с насыщением и гистерезисом;
 - провести статические и динамические исследования, в том числе исключить проблемы со сходимостью;
 - рассчитать магнитные поля и электрические токи, в том числе индуцированные;
 - определить локальные и интегральные потери, в том числе в нелинейных шихтованных материалах;
 - оценить э/м силы и моменты, в том числе с помощью инструмента ForceCalculation.
- Пример работы (рис. 6–8).

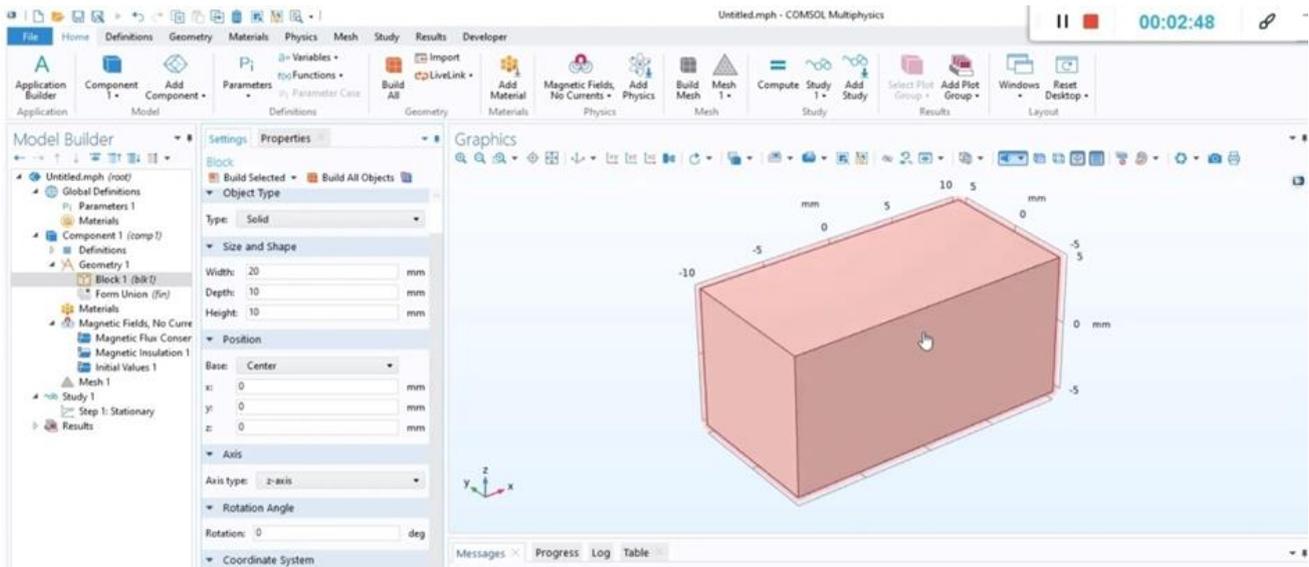


Рис. 6. Создание 3D-объекта и придание ему свойств магнита

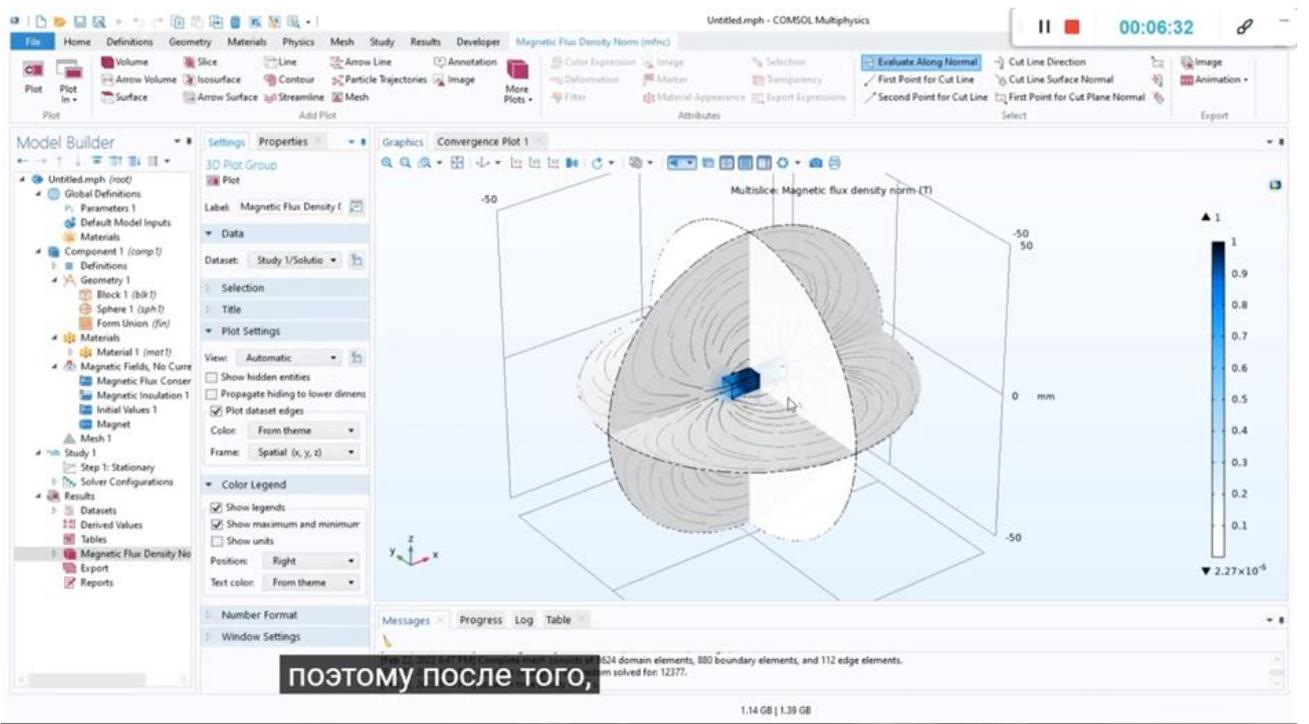


Рис. 7. Результат консольного расчета программы

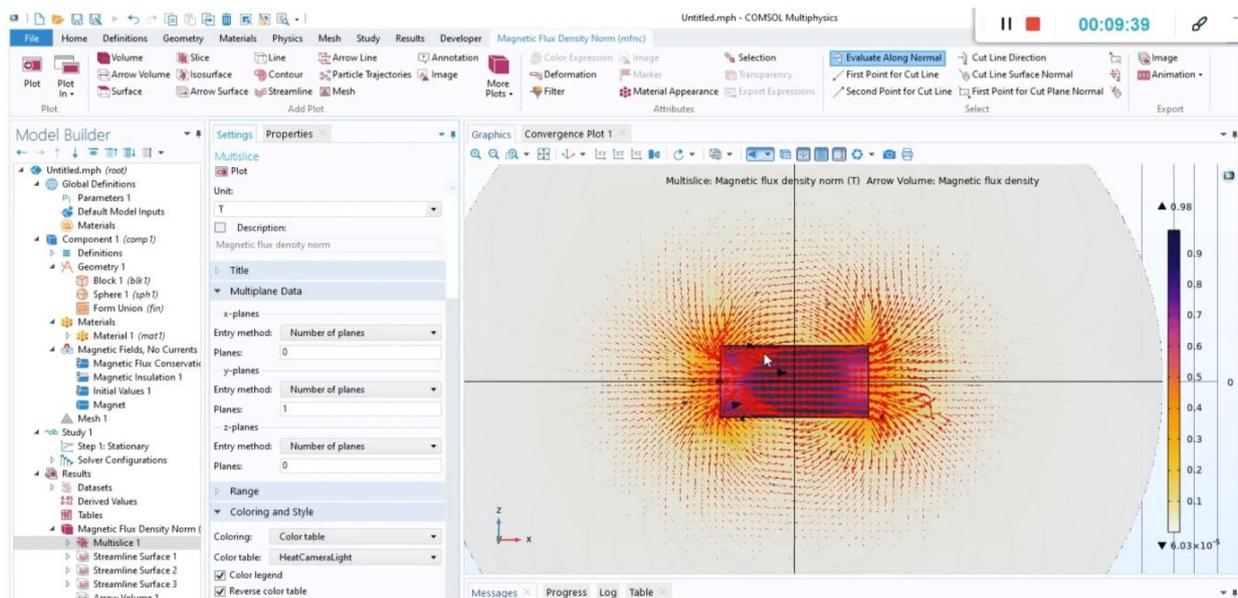


Рис. 8. Итоговое изображение после настройки

Основные преимущества пакета программ COMSOL Multiphysics заключаются в его специализации проведения моделирования большого множества различных реальных физических процессов и расчета соответствующих параметров. Так, COMSOL Multiphysics позволяет рассчитать или промоделировать физический процесс, тело или деталь в напряженно-деформированном состоянии, оценить его теплообмен с окружающей средой, выполнить расчет электромагнитного поля. Кроме того, пакет программ COMSOL Multiphysics может моделировать некоторые химические реакции, решать задачи гидродинамики и даже некоторые вопросы, связанные с биоинженерией. Перечисленное моделирование реализуется посредством составления программы среды математических расчетов Matlab или с помощью удобного графического интерфейса. Существующая база данных, содержащая соответствующие математические модули и уравнения значительно упрощают процесс моделирования и расчетов.

Недостатки: нет студенческой версии, есть пробная двухнедельная лицензия. Его возможности решения задач, связанных как с механикой твердого тела, так и с гидродинамикой, ограничены. Нет модуля dynamics. Когда дело доходит до CFD, он использует FEM, в то время как для приложений CFD FVM намного эффективнее.

Приложения 3D-моделирования SolidWorks. Программное обеспечение SolidWorks используется для всего: от быстрого прототипирования до проектирования и имеет решающее значение для многих методов проектирования и черчения. Это также полезно для разработки новых, инновационных продуктов. Производство: превращение проектов в продукты, включая машинные модули. Проектирование: поверхностное моделирование или параметрическое/прямое твердотельное моделирование. Инженерный анализ: электромагнитный анализ, термический анализ, анализ жидкости и многое другое. Выполнение электромагнитного анализа в данном программном продукте возможно с использованием соответствующих программных модулей HFWorks или EMS. Исходными данными для моделирования и расчетов являются 3D сборочные единицы или детали, выполненные в SolidWorks. Программное приложение EMS позволяет моделировать электромагнитное поле различной физической природы. Например, исследовать и рассчитать поля магнитной и электрической природы с потенциальными, динамическими или вихревыми свойствами. Приложение EMS позволяет рассчитать основные параметры электрических цепей, такие как сопротивление, емкость, импеданс, индуктивность различной степени сложности. Перечисленные возможности данного пакета можно добавить его способностью учитывать такие механические параметры, как крутящий момент и силу, а также учитывать омические потери, потери, вихревых токов, потери, связанные с петлей гистерезиса и т.п.

В целом EMS надстройка в SOLIDWORKS и надстройка, поддерживающая Autodesk Inventor, позволяют моделировать достаточно сложные электрические машины, приборы, аппаратуру радиоэлектронной промышленности, а также биомедицинское оборудование.

HFWorks – это программа для трехмерного моделирования полей, полностью интегрированная в рабочий стол SOLIDWORKS. HFWorks использует самые современные решатели конечных элементов и технологии построения сетки для расчета полей, а также параметров антенн и цепей. Он может имитировать отдельные элементы антенны, а также конфигурации с несколькими антенными



решетками. HFWorks также можно использовать для вычислений во временной области, таких как TDR и глазковая диаграмма (рис. 8). Он может предсказать возможности управления мощностью трехмерных структур и локализовать потенциальные области пробоя поля. Он также обеспечивает возможность имитации ВЧ-микроволнового нагрева в зависимости от приложенной мощности.

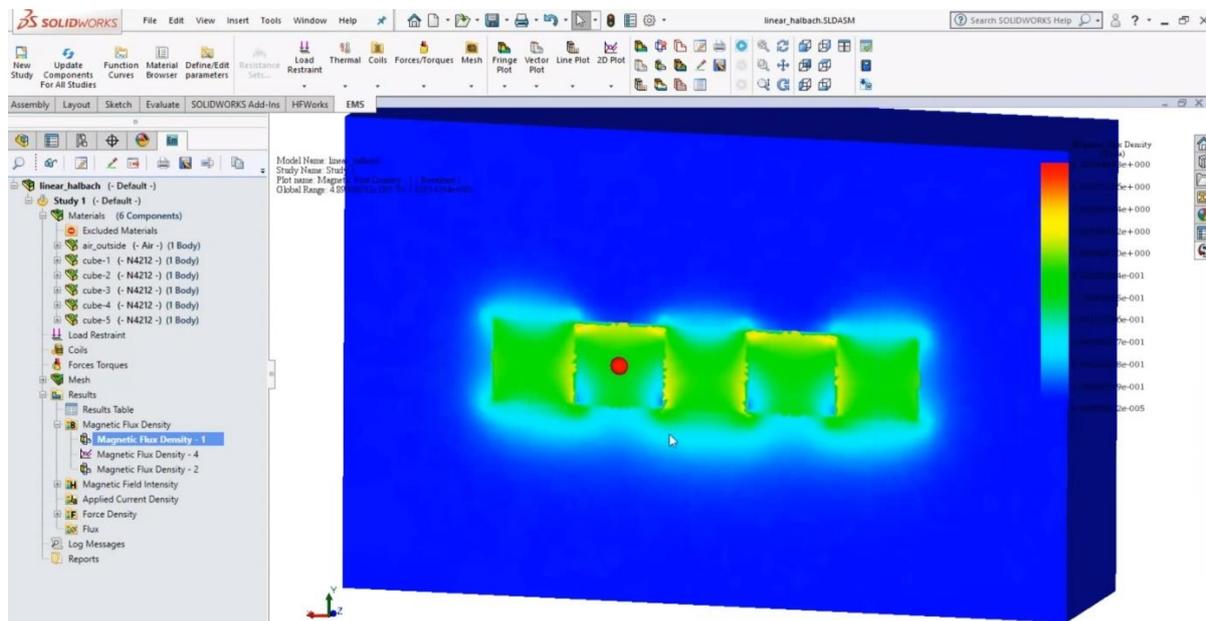


Рис. 9. Пример моделирования плотности магнитного поля на графике сечения через «докер холла»

Преимущества пакета:

- возможность удаленно делиться проектами в режиме реального времени;
- автоматическое определение размеров 3D-моделей;
- легко проверить интерференцию и расчеты;
- благодаря стандартным встроенным компонентам, включенным в 3D CAD, дизайнеры могут сэкономить время и, следовательно, деньги.

Недостатки:

- ограниченная совместимость с операционной системой (ОС). Для этого требуется компьютер с Windows, поскольку версии для MacOS нет;
- ограниченная функциональность 2D. Если вы хотите в основном проектировать в 2D, AutoCAD может быть лучшим вариантом;
- более высокая стоимость. Программное обеспечение требует как годовой подписки, так и первоначальных вложений в лицензию для доступа к частым обновлениям и технической поддержке. Студенты могут получить лицензию по сниженной цене для использования в образовательных целях. Однако Dassault не предоставляет бесплатных лицензий;
- их относительно новое внимание к облачным приложениям было представлено немного позже.

Может потребоваться некоторая работа, чтобы сделать его действительно корпоративным;

- некоторые 3D-модели не могут быть восстановлены с помощью функций и исцеления;
- можно использовать более быструю обработку;
- были сообщения о случайных сбоях. Для этого потребуется мощный компьютер;
- требуется дополнительная программа для управления файлами.

FEMM – это программный пакет, необходимый при решении задач низкочастотных электромагнитных процессов в двумерных плоских и осесимметричных областях пространства. На сегодняшний день данный программный пакет позволяет решать линейные и нелинейные задачи магнитостатики, гармонического магнитного поля, меняющегося во времени, а также линейные электростатические задачи. Кроме того, он применяется при решении задач определения стационарного теплового потока различной практической направленности.

Данный программный пакет, разделен на три части и представляет собой препроцессор интерфейса нескольких документов и постпроцессор для различных типов задач, решаемых FEMM. В его наличии имеется CAD-подобный интерфейс, позволяющий выполнить геометрическое построение решаемой задачи, а также определить свойства материала и граничных условий. В пакете программ



существует возможность импорта файлов Autocad DXF, что значительно облегчает и упрощает анализ существующих геометрических форм и объектов. Отображение поля в пакете программ выполняется в виде изображения контуров или графиков плотности и направления. Он также позволяет пользователю проверять числовые и геометрические значения поля в произвольных точках разрабатываемой модели, а также выполнять оценку набора различных интегралов и отображать различные интересные величины вдоль заданных пользовательских контуров. Основной особенностью пакета программ FEMM является возможность проектировщика обращаться к некоторым предельным случаям уравнений Максвелла при решении конкретных практических задач; также возможно решение задач магнетизма в низкочастотной области частот, в которых токами смещения можно пренебречь. Токи смещения обычно имеют отношение к проблемам магнетизма только на радиочастотах. В аналогичном ключе решатель электростатики рассматривает обратный случай, в котором рассматривается только электрическое поле и пренебрегается магнитное поле. FEMM также решает двумерные/осесимметричные стационарные задачи теплопроводности. Эта задача теплопроводности математически очень похожа на решение электростатических задач. Пример работы (рис. 10–12).

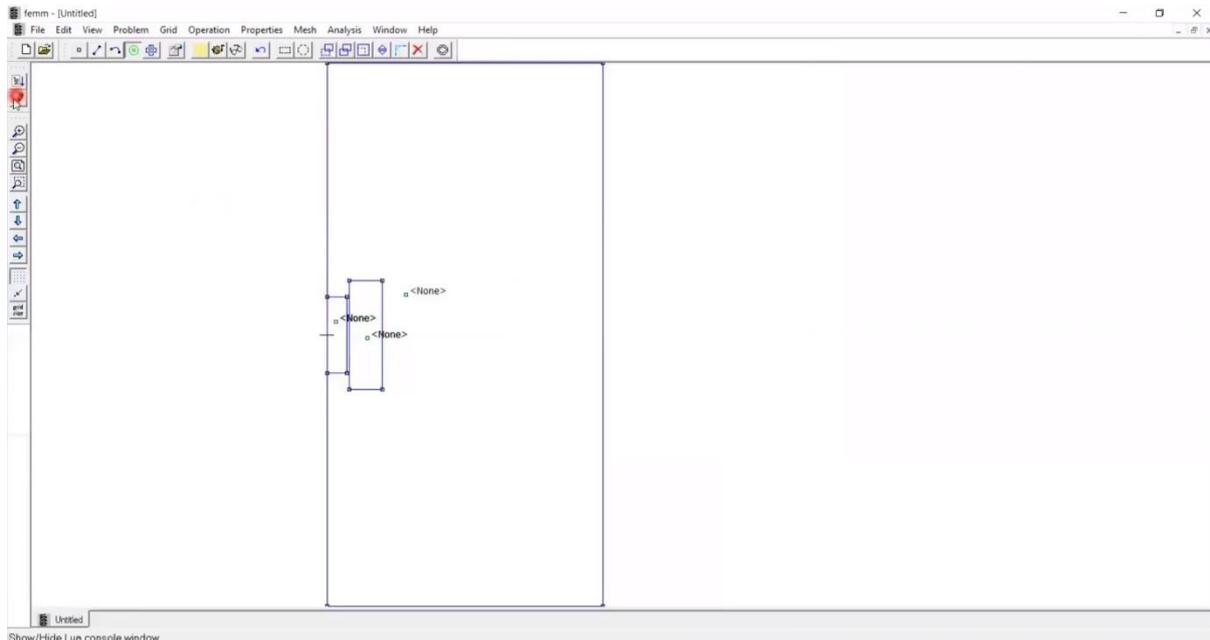


Рис. 10. Ввод начальных условий, среды, источника излучения

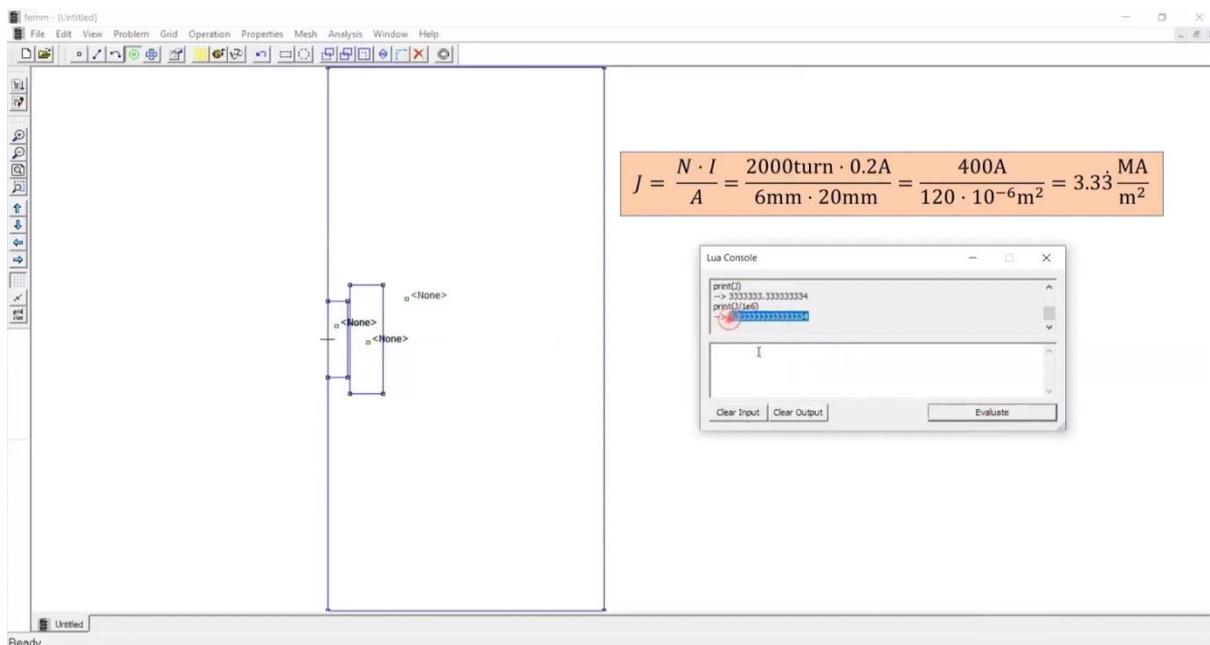


Рис. 11. Ввод расчета плотности тока

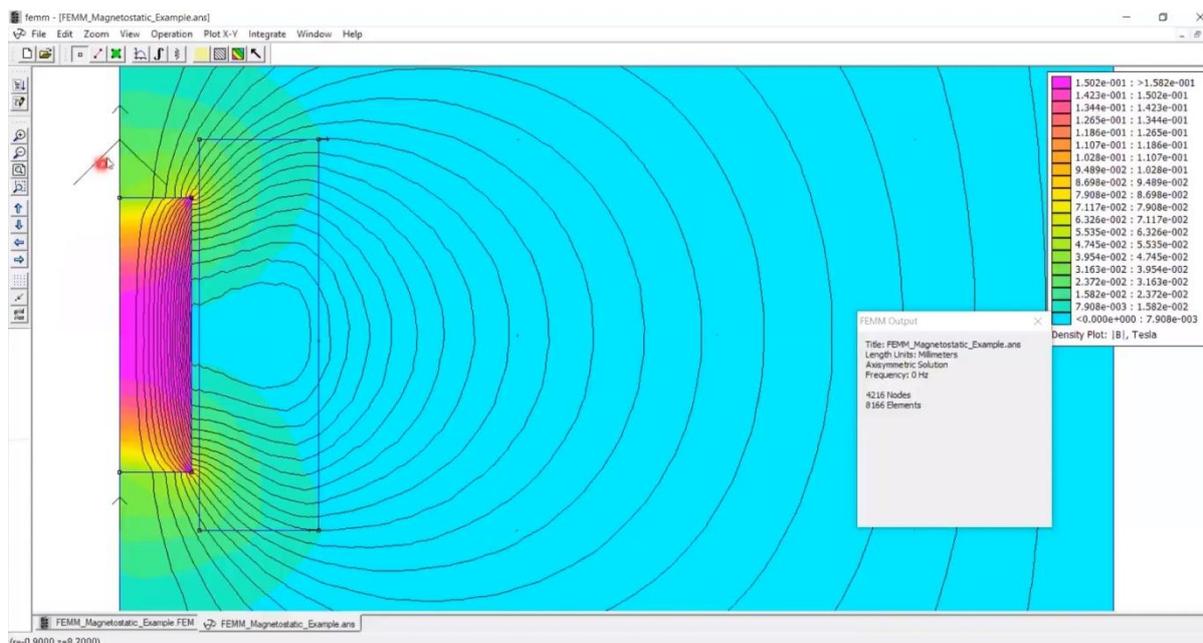


Рис. 12. Визуализация расчета параметров магнитного поля

Преимущества:

- программа бесплатная;
- возможность расчета электромагнитной и тепловой задачи;
- достаточно точный расчет;
- простой интерфейс.

Недостатки:

- работа только в 2D;
- отсутствует возможность совместного расчета электромагнитной и тепловой задачи;
- малая база материалов.

Программный продукт AnsysMaxwell является высокопроизводительным интерактивным программным пакетом. Он использует анализ на конечных элементах (FEA), необходимый при решении следующих типов задач:

- трехмерные (3D) задачи электрических областей применения;
- трехмерные (3D) задачи магнитостатических областей применения;
- трехмерные (3D) задачи вихревых токовых областей применения;
- задачи переходных процессов.

AnsysMaxwell позволяет рассчитать электростатические 3D-поля в диэлектриках с заданным распределением напряжений или зарядов. Кроме того, продукт позволяет дополнительно включить в расчетную модель емкости, силу или крутящий момент, что является преимуществом данного пакета программ.

AnsysMaxwell выполняет магнитостатический анализ и расчет линейных и нелинейных трехмерных магнитостатических постоянных полей по заданным пользователем распределением плотности тока, напряженности или внешних магнитных полей. По аналогии, по желанию пользователя в модель может быть внедрен учет крутящих моментов, сил и индуктивности двух видов собственной индуктивности и взаимной индуктивности.

Электрический расчет трехмерных полей в проводниках осложняется наличием пространственного распределения напряженности электрического поля, а также плотностью тока в фиксированный момент времени. Однако AnsysMaxwell позволяет выполнить такой расчет с учетом мощностных потерь, а также скомбинировать с решениями проводимости, напряженностью электрического поля и плотностью тока с учетом заданных граничных условий.

AnsysMaxwell оценивает значения вихревых токов с использованием гармонических законов синуса или косинуса или стационарных 3D магнитных полей. Он позволяет учитывать вихревые токи в твердых проводниках, т.е. в деталях машин приборов и устройств больших размеров. Причем источник поля задается пользователем путем задания распределения переменных токов с одинаковой



частотой, но с разными фазовыми углами. Другой способ задания источника – внешнее магнитное поле. Моделирование вихревых полей включает в себя излучение электромагнитных волн.

В программном продукте AnsysMaxwell предусмотрен учет переходных процессов. Он возможен в трехмерных магнитных полях с учетом временной области и реализуется для постоянных и переменных магнитных полей с произвольным изменением в зависимости от времени.

AnsysMaxwell может исследовать электрические цепи, подключенные к обмоткам с учетом эффектов вращательного или поступательного движения элементов конструкции моделируемого изделия (рис. 13).

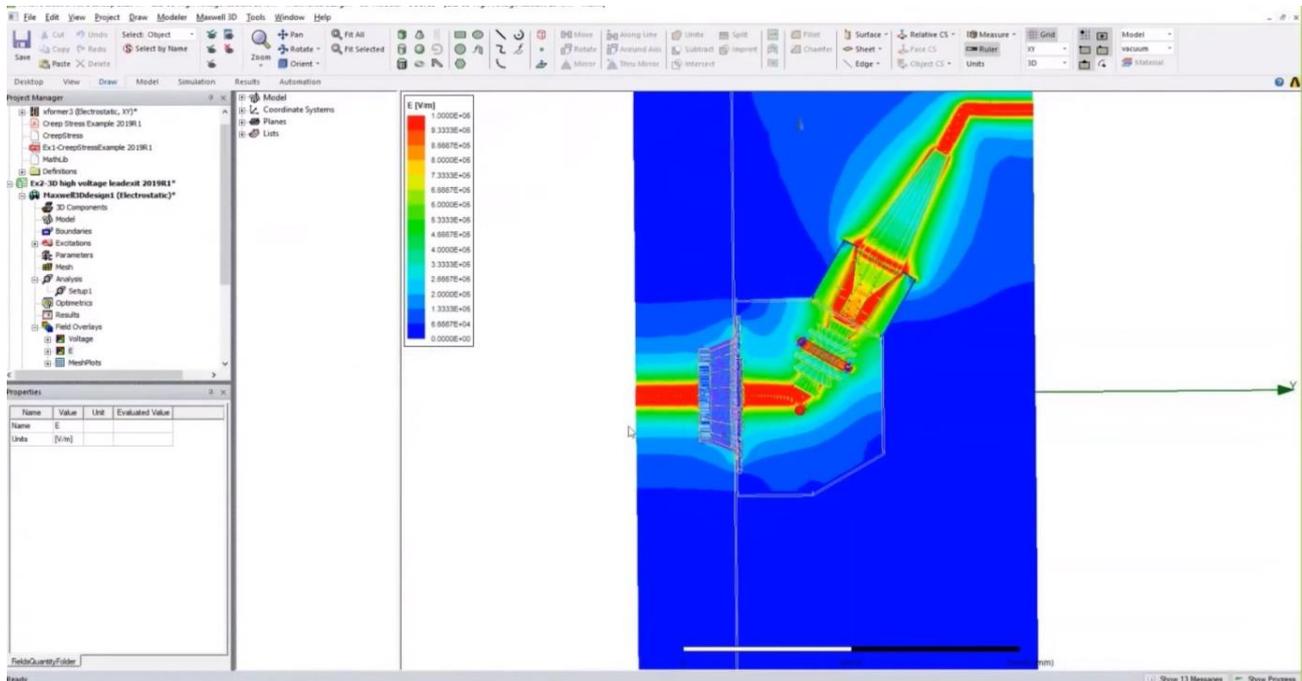


Рис. 13. Модель поля напряжения в высоковольтном вводе/выводе

Преимущества:

- моделирование в 2D и 3D;
- совместно с Ansys считает как тепловую, так и электромагнитную задачи;
- в наличии механизм коррекции $B(H)$ от температуры для материала;
- точный расчет, но медленный.

Недостатки:

- высокая стоимость;
- сложность в освоении.

Заключение

Каждая конкретная программа из данного перечня направлена на решение определенной проблемы. Они используют разные подходы к проектированию электромагнитных полей и разные методы их расчета, и все справляются с поставленными задачами. Среди программных пакетов есть как полностью бесплатные, так и платные, выбор всегда остается за пользователем. Помимо прочего, не все персональные компьютеры способны быстро производить вычислительные операции, из-за этого некоторые из пакетов (HFWorks, AnsysMaxwell) не будут подходить всем пользователям; также имеется ограничение в плоскости проектирования, для некоторых задач 2D моделирование не подходит (FEMM). Некоторые продукты упираются в высокую стоимость покупки/подписки (AnsysMaxwell, COMSOL Multiphysics). Ограничены возможности решения задач, связанных как с механикой твердого тела, так и с гидродинамикой (COMSOL Multiphysics); либо слишком узкоспециализированные продукты, расчеты на которых требуют обязательного наличия разведенных плат (CST StudioSuite). Выбирать пакет следует согласно поставленным задачам и ограничениям.



Список литературы

1. Аполлонский С. М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений : в 3 т. Т. 1. Виды физических полей и излучений. Нормативно-правовые документы : монография. М. : РУСАЙНС, 2016. 334 с.
2. Аполлонский С. М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений : в 3 т. Т. 2. Защитные материалы от физических полей и излучений : монография. М. : РУСАЙНС, 2016. 342 с.
3. Аполлонский С. М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений : в 3 т. Т. 3. Методы защиты от физических полей и излучений : монография. М. : РУСАЙНС, 2016. 336 с.
4. Andreev P. G., Yurkov N. K., Grishko A. K. [et al.]. Study of dielectric effect on signal propagation in the gigahertz range at elevated temperature // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF 2019). 2019. С. 8840587. doi: 10.1109/WECNF.2019.8840587
5. Yurkov N. K., Andreev P. G., Bushmelev P. E. Space-time analysis of conductive paths with allowance for temperature influence // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM. 2016. doi: 10.1109/SCM.2016.7519739
6. Mikheev M. Y., Roganov V. R., Andreev P. G. [et al.]. Developing the structure of the quality control system of power supply units in mobile robots // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 2017. С. 7998579. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998579
7. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. [et al.]. Determination of electromagnetic field strength taking into account the influence of reflections // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings. 2020. С. 9067494. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067494
8. Шпедт Е. Р., Андреев П. Г., Гришко А. К., Наумова И. Ю. Возможности «cst studio suite» при проектировании высокочастотных устройств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 2. С. 158–160.
9. Андреев П. Г., Волков В. А., Фирсова Д. И., Китаев М. Б. Возможности ANSYS HFSS при проектировании печатных плат и узлов радиоэлектронных средств // Современные информационные технологии. 2015. № 22. С. 25–28.
10. Андреев П. Г., Талибов Н. А., Осипов П. М. Возможности «cst studio suite» при проектировании высокочастотных устройств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2007. Т. 1. С. 146–148.
11. Гришко А. К., Тумакова И. А., Андреев П. Г. [и др.]. Классификация естественных радиопомех и основные методы борьбы с ними // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2019. Т. 2. С. 283–287.
12. Андреев П. Г., Нагаев Т. Р., Комзалова М. А. Воздействие электромагнитных импульсов на радиоэлектронную аппаратуру // Современные информационные технологии. 2018. № 28 (28). С. 48–51.
13. Гришко А. К., Андреев П. Г., Тумакова И. А. [и др.]. Применение имитационного моделирования при оценке устойчивости радиосвязи // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 1. С. 114–115.
14. Куатов Б. Ж., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. К проблеме создания цифровых моделей теплогрузимых элементов радиоэлектронной системы // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 9–19. doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-2
15. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме синтеза многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 33–41. doi: 10.21685/2307-4205-2022-3-4
16. Баннов В. Я., Цуприк А. Д., Новиков К. С. [и др.]. Решение задач волновых полей с применением нейронных сетей // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2022. Т. 2. С. 103–104.

References

1. Apollonskiy S. M. *Zashchita tekhnosfery ot vozdeystviya fizicheskikh noley i izlucheniy: v 3 t. T. 1. Vidy fizicheskikh noley i izlucheniy. Normativno-pravovye dokumenty: monografiya = Protection of the technosphere from the effects of physical zeros and radiation: in 3 vols. Volume 1. Types of physical zeros and radiation. Regulatory documents: monograph.* Moscow: RUSAYNS, 2016:334. (In Russ.)
2. Apollonskiy S.M. *Zashchita tekhnosfery ot vozdeystviya fizicheskikh noley i izlucheniy: v 3 t. T. 2. Zashchitnye materialy ot fizicheskikh poley i izlucheniy: monografiya = Protection of the technosphere from the effects of physical zeros and radiation: in 3 vols. Volume 2. Protective materials from physical fields and radiation: monograph.* Moscow: RUSAYNS, 2016:342. (In Russ.)
3. Apollonskiy S.M. *Zashchita tekhnosfery ot vozdeystviya fizicheskikh noley i izlucheniy: v 3 t. T. 3. Metody zashchity ot fizicheskikh poley i izlucheniy: monografiya = Protection of the technosphere from the effects of physical zeros and radiation: in 3 vols. Volume 3. Methods of protection from physical fields and radiation: monograph.* Moscow: RUSAYNS, 2016:336. (In Russ.)
4. Andreev P.G., Yurkov N.K., Grishko A.K. et al. Study of dielectric effect on signal propagation in the gigahertz range at elevated temperature. *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF 2019)*. 2019:8840587. doi: 10.1109/WECNF.2019.8840587



5. Yurkov N.K., Andreev P.G., Bushmelev P.E. Space-time analysis of conductive paths with allowance for temperature influence. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM*. 2016. doi: 10.1109/SCM.2016.7519739
6. Mikheev M.Y., Roganov V.R., Andreev P.G. et al. Developing the structure of the quality control system of power supply units in mobile robots. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings*. 2017:7998579. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998579
7. Grishko A.K., Kochegarov I.I., Lysenko A.V. et al. Determination of electromagnetic field strength taking into account the influence of reflections. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings*. 2020:9067494. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067494
8. Shpedt E.R., Andreev P.G., Grishko A.K., Naumova I.Yu. The capabilities of the «cst studio suite» in the design of high-frequency devices. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost' i kachestvo” = Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*. 2020;2:158–160. (In Russ.)
9. Andreev P.G., Volkov V.A., Firsova D.I., Kitaev M.B. ANSYS HFSS capabilities in the design of printed circuit boards and electronic components. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2015;(22):25–28. (In Russ.)
10. Andreev P.G., Talibov N.A., Osipov P.M. The capabilities of the «cst studio suite» in the design of high-frequency devices. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*. 2007;1:146–148. (In Russ.)
11. Grishko A.K., Tumakova I.A., Andreev P.G. et al. Classification of natural radio interference and basic methods of dealing with them. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*. 2019;2:283–287. (In Russ.)
12. Andreev P.G., Nagaev T.R., Komzalova M.A. The effect of electromagnetic pulses on electronic equipment. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2018;(28):48–51. (In Russ.)
13. Grishko A.K., Andreev P.G., Tumakova I.A. et al. The use of simulation modeling in assessing the stability of radio communications. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*. 2020;1:114–115. (In Russ.)
14. Kumatov B.Zh., Rybakov I.M., Yurkov N.K. On the problem of creating digital models of heat-loaded elements of an electronic system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1): 9–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-2
15. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of synthesis of a multi-position radar station for detecting unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):33–41. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-3-4
16. Bannov V.Ya., Tsuprik A.D., Novikov K.S. et al. Solving wave field problems using neural networks. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*. 2022;2:103–104. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 18.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.07.2023

Принята к публикации / Accepted 05.08.2023